BRGM

MÉRINOS

Modélisation de l'évapotranspiration, du ruissellement et de l'infiltration dans la zone non saturée

D. THIERY

Avril 1990
R 30623

EAU 4S 90

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES
SERVICES SOL ET SOUS-SOL
Département EAU
B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2 - France -Tél. : (33) 38.64.34.34

RESUME

Ce rapport présente en détail le modèle MERINOS du département EAU du BRGM. Le modèle MERINOS est un logiciel de modélisation hydrodynamique en régime transitoire des écoulements en milieux poreux monodimensionnels **non saturés**. Il permet de calculer les charges et les teneurs en eau en tout point d'un milieu, saturé ou non, par résolution de l'équation dite de Richards. Le schéma de résolution utilise les différences finies avec des mailles de dimensions variables regroupées en couches homogènes. Le modèle MERINOS est adapté aux calculs de recharge (naturelle ou artificielle) de nappes souterraines ainsi qu'aux calculs d'évapotranspiration et de reprises à la nappe.

Le logiciel est écrit en FORTRAN 77 compatible et la version 2.0 qui est présentée dans ce rapport est très conviviale car les paramètres de calcul peuvent être définis par un préprocesseur plein écran appelé BORDENOS.

Le logiciel est opérationnel sur les ordinateurs **Vax** (sous VMS ou VWS) ainsi que sur tous les micro-ordinateurs compatibles PC et PS (avec 640 K de mémoire vive). Le rapport présente à la fois les principes du modèle ainsi qu'un mode d'emploi détaillé du logiciel avec des exemples d'utilisation.

TABLE DES MATIERES

Pages

INTRODUCTION 1

1 - DOMAINE D'APPLICATION DU MODELE MERINOS 2

2 - CARACTERISTIQUES DU MODELE MERINOS VERSION 2.0 3

PREMIERE PARTIE - MODE D'EMPLOI DU MODELE MERINOS 5

1 - DONNEES NECESSAIRES POUR UTILISER LE MODELE MERINOS ET FICHIERS RESULTATS 7

2 - CONVENTIONS RELATIVES AUX DONNEES UTILISEES 8

3 - DESCRIPTION DU FICHIER PARAMETRES 8

3.1 - Paragraphe n° 1 : Noms des fichiers d'entrée 9
3.2 - Paragraphe n° 2 : Noms des fichiers de résultats 9
3.3 - Paragraphe n° 3 : Unités des grandeurs 11
3.4 - Paragraphe n° 4 : Résolution et définition des lois du sol 12
3.5 - Paragraphe n° 5 : Description de chaque couche 14
3.6 - Paragraphe n° 6 : Condition à la limite supérieure 16
3.7 - Paragraphe n° 7 : Condition à la limite inférieure 17
3.8 - Paragraphe n° 8 : Etat initial dans les mailles 19
3.9 - Paragraphe n° 9 : Stock partiel 20
3.10 - Paragraphe n° 10 : Contrôle des éditions de bilans et de profils 21
3.11 - Paragraphe n° 11 : Edition de profils à dates fixes irrégulières 21
3.12 - Paragraphe n° 12 : Historiques des états dans certaines mailles 21

4 - INITIALISATION DU MODELE 22

5 - DESCRIPTION DES FICHIERS D'ENTREE 23

6 - DESCRIPTION DES FICHIERS DE RESULTATS 23

7 - EXEMPLES D'UTILISATION 28

DEUXIEME PARTIE - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU MODELE 45

1 - EQUATION DES ECOULEMENTS DANS LA ZONE NON-SATUREE 47

2 - CONDITIONS AUX LIMITES 49

3 - RESOLUTION DU SYSTEME D'EQUATIONS 51

TROISIEME PARTIE - ANALYSE DIMENSIONNELLE 57

1 - EQUATION ADIMENSIONNELLE 59

2 - MAILLAGE IDENTIQUE, PERMEABILITE AUGMENTEE 60

3 - DEBITS IMPOSES (PAR LES PRECIPITATIONS ATMOSPHERIQUES PAR EXEMPLE) 60

4 - PAS DE TEMPS CRITIQUE 61

5 - MISE EN FACTEUR D'ECHELLE 63

QUATRIEME PARTIE - DEFINITION ET AJUSTEMENT DES LOIS CARACTERISTIQUES DU SOL 65

1 - DEFINITION DES LOIS CARACTERISTIQUES DU SOL 67

2 - AJUSTEMENT DES LOIS CARACTERISTIQUES 73

3 - QUELQUES VALEURS DE CARACTERISTIQUES DU SOL 76

CINQUIEME PARTIE - SOLUTIONS ANALYTIQUES ET QUASI-ANALYTIQUES 79

1 - REGIME PERMANENT 81

2 - INJECTION CONSTANTE - SOLUTION A L'INFINI 83

3 - SOLUTION DE PHILIP 84

4 - SOLUTION QUASI ANALYTIQUE DE PARLANGE 89

5 - SOLUTION ANALYTIQUE D'OGATA ET BANKS 91

SIXIEME PARTIE - VALIDATION DU MODELE 93

1 - INFILTRATION A CHARGE CONSTANTE : SOLUTION D'OGATA ET BANKS 95

2 - EVAPORATION CONSTANTE ET REPRISE A LA NAPPE 95

3 - INFILTRATION A DEBIT CONSTANT : SOLUTION QUASI ANALYTIQUE DE PARLANGE 96

4 - INFILTRATION A CHARGE (OU TENEUR EN EAU) CONSTANTE : SOLUTION QUASI-ANALYTIQUE DE PHILIP 96

ANNEXE - NOMBRE D'ITERATIONS ET COEFFICIENT DE SOUS-RELAXATION 102

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 103

LEXIQUE 106

INDEX 108

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Logiciel Mérinos. Fichier paramètres site de Mézières.

Figure 2 - Logiciel Mérinos. Fichiers d'entrée : exemple de fichiers de flux supérieur et d'état initial.

Figure 3 - Logiciel Mérinos. Fichiers résultants : exemple de fichiers limite, bilan et historique.

Figure 4 - Logiciel Mérinos. Fichiers MEZIERES.LST ; extraits du listing : index des fichiers, unités et paramètres hydrodynamique.

Figure 5 - Logiciel Mérinos. Fichiers MEZIERES.LST ; extraits du listing : état initial.

Figure 6 - Logiciel Mérinos. Fichiers MEZIERES.LST ; extraits du listing : deux premiers pas de calcul.

Figure 7 - Logiciel Mérinos. Site de Mézières. Evolution des variables calculées.

Figure 8 - Logiciel Mérinos. Site de Mézières. Evolution des variables calculées (suite).

Figure 9 - Logiciel Mérinos. Fichier paramètres pour simuler un écoulement en charge pendant 30 jours.

Figure 10 - Logiciel Mérinos. Fichier paramètres pour simuler un drainage interne pendant 50 jours.

Figure 11 - Logiciel Mérinos. Fichier paramètres pour simuler un débit imposé en surface pendant 22 jours.

Figure 12 - Logiciel Mérinos. Fichier paramètres pour simuler une évaporation constante en régime permanent.

Figure 13 - Drainage interne : évolution des stocks en eau.

Figure 14 - Drainage interne : évolution des débits d'échange et des teneurs en eau.

Figure 15 - Analyse dimensionnelle - simulation d'un drainage interne en variables réduites.

Figure 16 - Ajustement d'une courbe de rétention homographique au sol de Yolo light clay cité par Philip.

Figure 17 - Solution quasi-analytique de Philip (trait continu).

Figure 18 - Solution quasi-analytique de Philip.

Figure 19 - Solution de Parlange et évaporation avec reprise à la nappe.

Figure 20 - Solution analytique de Ogata et Banks.

INTRODUCTION

Le modèle MERINOS est un logiciel de modélisation hydrodynamique en régime transitoire des écoulements en milieux poreux monodimensionnels non saturés. Dans la version 2.0 qui fait l'objet de ce rapport la direction monodimensionnelle est la direction verticale uniquement. L'équation qui est résolue dans le modèle est l'équation dite de RICHARDS qui permet de calculer les charges en tout point du domaine, que le milieu soit saturé ou non. Le schéma de résolution utilise les différences finies avec des mailles de dimensions variables regroupées en différentes couches homogènes. Chaque couche peut avoir des paramètres différents et il est ainsi possible de modéliser les écoulements verticaux à travers des sols hétérogènes ou à travers des sandwiches de sols. La souplesse du maillage permet de modéliser aussi bien les écoulements en laboratoire à travers une colonne de sol de quelques décimètres de haut pendant une courte durée que les écoulements naturels sur le terrain à travers plusieurs dizaines de mètres de sol hétérogène pendant plusieurs années.

Le domaine d'application le plus fréquent du modèle MERINOS est le calcul de la recharge des nappes souterraines en régime transitoire, à partir de séquences de pluies et d'évapotranspirations potentielles, mais le modèle permet également les calculs d'évaporation ou d'évapotranspiration. Il est possible également d'utiliser le modèle en régime permanent. Le modèle permet d'analyser les mécanismes des écoulements à travers la zone non saturée ; la recharge calculée peut être introduite dans un modèle d'aquifère.

Le modèle décrit dans ce rapport est écrit en FORTRAN 77 standard et il est utilisable aussi bien sur les systèmes centraux (ordinateur Vax par exemple, sous VMS et VWS) que sur tous les micro-ordinateurs compatibles IBM/PC ou IBM/PS à condition de posséder un coprocesseur arithmétique et 640 K de mémoire vive.

Le logiciel MERINOS a été écrit au département EAU sur les fonds propres du BRGM et a été utilisé sur plusieurs sujets de recherche, en particulier sur les sites de Mézières-les-Cléry (Loiret) et celui de Barogo (Burkina Faso).

La version décrite dans ce rapport est la version 2.0 de Décembre 1989. Elle est extrêmement facile à mettre en oeuvre avec l'aide en particulier du logiciel BORDENOS qui permet de préparer les paramètres avec un conversationnel pleine page très convivial.

A terme, la version 3.0, qui sera mise à disposition des utilisateurs en 1990, permettra de calculer également les transferts de masse (chlore, nitrates, polluants, traceurs etc.) à travers les sols. Cette version utilise le même "moteur" que la version 2.0.

Ce rapport est composé de six parties complètement indépendantes qui peuvent donc être lues séparément ; la première partie décrit en détail le mode d'emploi du modèle et présente un exemple d'application. Un lexique des termes employés et un index sont placés en fin de rapport.

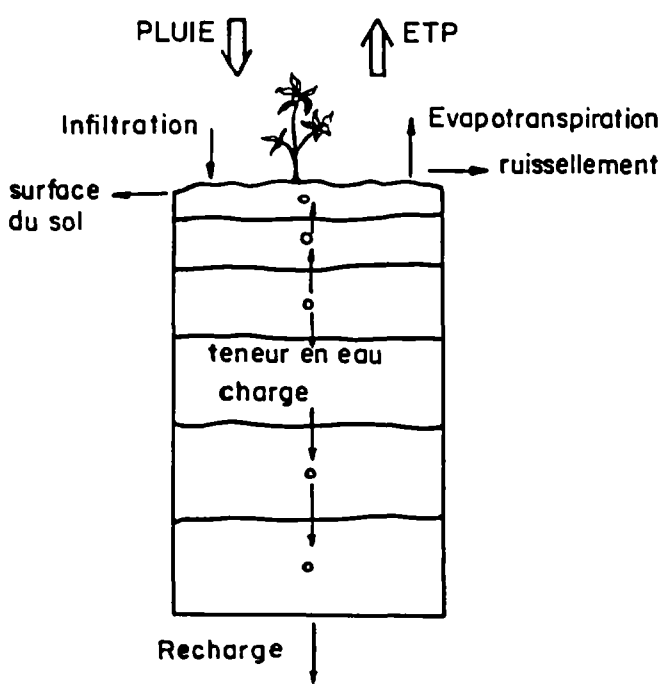
1 - DOMAINE D'APPLICATION DU MODELE MERINOS

Dans sa version 2.0 de Décembre 1989, le modèle MERINOS présente les caractéristiques suivantes :

- écoulements monodimensionnels verticaux,
- maillage irrégulier avec un regroupement par couches homogènes,
- calculs en régime transitoire ou permanent,
- possibilités de mises en charge locales ou généralisées.

Il permet les opérations suivantes :

- calcul des écoulements à travers un sol non saturé ou tout autre milieu poreux saturé ou non (massif filtrant), site de décharge etc.,
- évaluation de la recharge naturelle ou artificielle des aquifères sous-jacents,
- évaluation de la reprise à la nappe par évaporation ou évapotranspiration,
- réalisation de bilans d'eau au niveau du sol,
- validation de modèles hydrologiques globaux : pluie-sol-niveau de nappe,
- calcul des entrées d'un modèle hydrodynamique de nappe souterraine,
- analyse des mécanismes des écoulements à travers la zone non saturée,
- calcul du flux d'entrainement des pollutions.



2 - CARACTERISTIQUES DU MODELE MERINOS VERSION 2.0

Les caractéristiques du modèle MERINOS version 2.0 sont les suivantes :

- schéma monodimensionnel vertical,
- maillage irrégulier,
- paramètres hétérogènes,
- résolution de l'équation de Richards par différences finies,
- résolution implicite avec processus itératif pour estimer les paramètres en fin de pas de temps,
- écriture en FORTRAN 77 standard,
- conditions aux limites très variées par imposition à la limite supérieure et inférieure d'une des lois suivantes en fonction du temps :
  - ★ débit imposé (positif ou négatif),
  - ★ charge imposée,
  - ★ succion imposée,
  - ★ teneur en eau imposée,
  - ★ gradient de charge imposé (limite inférieure uniquement),
- conditions initiales très variées à choisir parmi les suivantes :
  - ★ profil de charge,
  - ★ profil de teneur en eau,
  - ★ charge, teneur en eau ou succion constante sur la verticale,
  - ★ couples de valeurs (profondeur-charge) ou (profondeur-teneur en eau),
- sorties du modèle élaborées :
  - ★ flux, charges, teneurs en eau, succion aux limites supérieures et inférieures,
  - ★ stock en eau sur toute la colonne ainsi que dans un intervalle de profondeur restreint correspondant à une zone d'investigation expérimentale,
  - ★ historiques des états de certaines mailles choisies par l'utilisateur,
  - ★ profils de toute la colonne à certaines dates choisies par l'utilisateur,
- couplage immédiat à un certain nombre de logiciels du département EAU du BRGM :
  - ★ GRECO ou GRETA pour la visualisation des évolutions au cours du temps,
  - ★ INGRID pour la réalisation de diagrammes temps-profondeur sous forme d'isovaleurs.

Le modèle MERINOS présente un certain nombre d'originalités par rapport aux modèles classiques d'écoulements à travers la zone non saturée. En effet, il est opérationnel en pratique pour étudier des écoulements réels à travers d'épaisses tranches de sol et pendant de longues durées.

Un algorithme spécial a été adapté pour traiter de tels cas. Il permet en particulier -pour étudier la recharge des aquifères- d'utiliser des mailles de 20 à 50 centimères d'épaisseur et des pas de temps de quelques fractions de jour (en périodes de fortes averses) à quelques jours (en périodes

plus sèches). Il est ainsi possible de simuler, en continu et avec une bonne précision -les écoulements pendant plusieurs années à travers une zone non saturée de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. L'algorithme est cependant exact et peut fonctionner également avec des mailles de quelques centimètres d'épaisseur et des pas de temps de quelques secondes.

PREMIERE PARTIE
MODE D'EMPLOI DU MODELE MERINOS

1 - DONNÉES NÉCESSAIRES POUR UTILISER LE MODÈLE MERINOS (version 2.0) ET FICHIERS RÉSULTATS

Pour utiliser le modèle MERINOS il faut disposer des données suivantes :

- Un découpage d'une tranche de sol en une ou plusieurs couches homogènes
- Un découpage de chaque couche en mailles verticales
- Un état initial du sol en début de calcul
- Deux lois caractéristiques du sol (éventuellement différentes dans chaque couche)
  - la loi de rétention : pression - teneur en eau
  - la loi de perméabilité : perméabilité-pression ou perméabilité-teneur en eau
- Une série de valeurs en fonction du temps pour les limites supérieure et inférieure du maillage : possibilité d'imposer un flux (débit), une charge, une pression ou un gradient unitaire

Le logiciel MERINOS utilise en entrée les fichiers suivants :

- Le fichier paramètres qui définit les unités, les options, le maillage, les lois caractéristiques, les noms des autres fichiers etc ; ce fichier est obligatoire.
- Un fichier de conditions à la limite supérieure (facultatif ... mais fréquent)
- Un fichier de conditions à la limite inférieure (facultatif)
- Un fichier d'état initial (facultatif)

En sortie, le logiciel MERINOS produit les fichiers résultats suivants :

- Un fichier listage (facultatif)
- Un fichier historique des limites (états et flux)
- Un fichier historique des bilans cumulés
- Un fichier historique des états de certaines mailles (facultatif)
- Un fichier de profils (de charge, de teneur en eau et de débit de transit) à certaines dates
- Un fichier d'état final en fin de simulation.

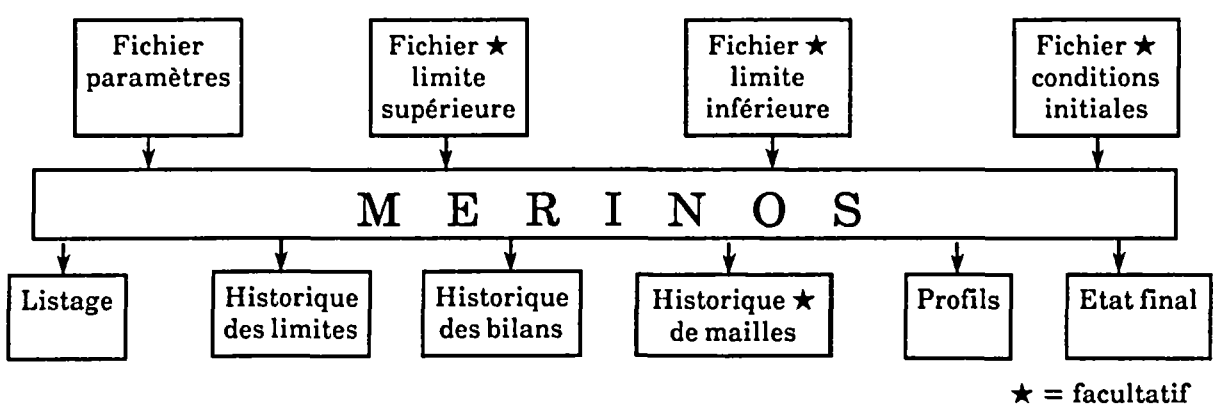


Schéma des fichiers en entrée et en sortie du modèle MERINOS

2 - CONVENTIONS RELATIVES AUX DONNEES UTILISEES

Les conventions choisies pour les données utilisées sont les suivantes :

- les perméabilités, les temps, les altitudes ou charges, les débits ou flux peuvent être donnés par l'utilisateur en n'importe quelle unité choisie par lui,
- l'unité des altitudes et celle des charges (ou des pressions) doit cependant être la même ;
- les stocks calculés par le modèle (sous forme de lame d'eau) seront exprimés dans une unité choisie par l'utilisateur.

Par ailleurs :

- Altitudes : elles sont positives vers le haut, l'origine (zéro) étant prise à la surface du sol.
- Charges : quand le sol n'est pas saturé, les charges sont toujours négatives.
- Pressions : elles sont toujours négatives (ou nulles si le sol est saturé).
- Flux ou Débits : ce sont des débits par unité de surface [$L.T^{-1}$]
- Teneurs en eau : ce sont des teneurs en eau volumiques (sans unité). Elles ne sont pas exprimées en pour cent mais en m^3 d'eau par m^3 de volume de terrain, c'est-à-dire en m^3/m^3 donc par un nombre compris entre 0 et 1.
- Stocks en eau : ce sont des volumes d'eau par unité de surface donc des longueurs [L].

3 - DESCRIPTION DU FICHIER PARAMETRES

Les paramètres nécessaires au fonctionnement du modèle MERINOS sont rassemblés dans un fichier - appelé "fichier paramètres" (voir exemple au paragraphe 7) qui peut être créé ou modifié facilement par le logiciel convivial BORDENOS (BORDEreau de mériNOS.

Les paramètres sont regroupés en 12 paragraphes numérotés de 1 à 12. Le numéro de chaque paramètre se compose du numéro du paragraphe suivi de son numéro d'ordre dans le paragraphe. Le paragraphe n° 5 qui concerne la description et le maillage de chaque couche est lui-même composé d'un paragraphe par couche. Un nombre réel est noté [R] ; un nombre entier [E].

Les 12 paragraphes sont les suivants :

```
Paragraphe  1 :  *** Nom des eventuels fichiers donnees Entree      ***
Paragraphe  2 :  *** Noms des fichiers de Resultats                 ***
Paragraphe  3 :  *** Unites des donnees                             ***
Paragraphe  4 :  *** Resolution et Choix des type de Lois de sol    ***
Paragraphe  5 :  *** Maillage et Lois caracteristiques du sol       ***
Paragraphe  6 :  *** Limite Superieure du sol                       ***
Paragraphe  7 :  *** Limite Inferieure du sol                       ***
Paragraphe  8 :  *** Etat initial au debut des calculs              ***
Paragraphe  9 :  *** Limites d'une tranche pour un Stock partiel    ***
Paragraphe 10 :  *** Editions Regulieres de Bilans et de Profils    ***
Paragraphe 11 :  *** Editions de Profils a dates Fixes              ***
Paragraphe 12 :  *** Numeros des mailles a historique               ***
```

3.1 - PARAGRAPHE N° 1 : NOMS DES FICHIERS D'ENTREE

Ce paragraphe contient les noms de 3 fichiers qui pourront éventuellement être lus pour définir respectivement :

- L'évolution au cours du temps de la condition imposée à la limite supérieure.
- L'évolution au cours du temps de la condition imposée à la limite inférieure.
- Un profil définissant l'état initial sur la verticale.

```
1 *** Nom des eventuels fichiers donnees Entree        ***
1.1  Fichier prevu LIMITE SUP    : [text]
1.2  Fichier prevu LIMITE INF    : [text]
1.3  Fichier prevu ETAT INIT.    : [text]
```

Paramètre 1.1 - Nom de l'éventuel fichier de limite supérieure (50 caractères)
[Nom par défaut : MERINOS.SUP]

Ce fichier ne sera utilisé que si le paramètre 6.2 a la valeur 1 ou 2 (condition non constante).

Paramètre 1.2 - Nom de l'éventuel fichier de limite inférieure (50 caractères)
[Nom par défaut : MERINOS.INF]

Ce fichier ne sera utilisé que si le paramètre 7.2 a la valeur 1 ou 2.

Paramètre 1.3 - Nom de l'éventuel fichier d'état initial (50 caractères)
[Nom par défaut : MERINOS.INI]

Ce fichier ne sera utilisé que si le paramètre 8.3 a la valeur 1 ou 2.

3.2 - PARAGRAPHE N° 2 : NOMS DE FICHIERS DE RESULTATS

```
2 *** Noms des fichiers de Resultats                   ***
2.1  Fichier LISTING             : [text]
2.2  Fichier HISTORIQUE LIMIT    : [text]
2.3  Fichier HISTORIQUE MAILL    : [text]
2.4  Fichier HISTORIQUE BILAN    : [text]
2.5  Fichier PROFILS CALCULES    : [text]
2.6  Fichier ETAT FINAL          : [text]
```

Paramètre 2.1 - Nom à donner au fichier Listage (50 caractères)
[Nom à donner par défaut : MERINOS.LST]

C'est le nom que portera le fichier qui contiendra tous les détails du calcul et permettra d'en reconstituer pas à pas toutes les étapes et de vérifier les données d'entrées. Après un premier passage de contrôle ce fichier pourra souvent être allégé ou même supprimé en utilisant le paramètre 4.1 : tous les résultats importants apparaissant également dans d'autres fichiers spécifiques.

Paramètre 2.2 - Nom à donner au fichier Historiques des limites (50 caractères)
[Nom à donner par défaut : MERINOS.LIM]

C'est le nom que portera le fichier qui contiendra, pour chaque pas de temps, les informations relatives aux conditions à la limite supérieure et inférieure : (date, durée du pas de temps, charge du haut et du bas ; condition imposée à la limite supérieure, débit de ruissellement, débit d'infiltration, stock total, stock partiel dans une tranche, cote du plan de flux nul, erreur de bilan, etc.).

Paramètre 2.3 - Nom à donner au fichier des Historiques par mailles (50 caractères)
[Nom à donner par défaut : MERINOS.MAI]

C'est le nom que portera le fichier qui contiendra, pour un certain nombre de mailles choisies par l'utilisateur au paragraphe 12 (paramètre 12.1), l'évolution au cours du temps des paramètres qui lui sont relatifs : date, durée du pas de temps, charge, succion, teneur en eau, débit d'échange par la face supérieure de la maille.

Paramètre 2.4 - Nom à donner au fichier Historique des bilans (50 caractères)
[Nom à donner par défaut : MERINOS.BIL]

C'est le nom que portera le fichier qui contiendra tous les termes permettant de suivre pas à pas le bilan cumulé (exprimé en unités de stock) des écoulements : date, pluie-ETP, ETP, ETR, infiltration, ruissellement, recharge, variation de stock, erreur de bilan cumulée, etc.

Paramètre 2.5 - Nom à donner au fichier des Profils calculés (50 caractères)
[Nom à donner par défaut : MERINOS.PRO]

C'est le nom que portera le fichier qui contiendra les profils : (altitude, charge, teneur en eau, débit en haut de maille) pour les dates choisies aux paragraphes 10 et 11. Chaque profil (qui contient la date de manière explicite) pourrait éventuellement être réutilisé comme état initial pour reprendre une simulation à une date donnée.

Paramètre 2.6 - Nom à donner au fichier Etat final (50 caractères)
[Nom à donner par défaut : MERINOS.FIN]

C'est le nom que portera le fichier qui contiendra l'état final dans les mailles en fin de simulation. Il est de la forme : altitude, charge, teneur en eau. Le fichier contient de manière explicite la date de la fin de la simulation. Ce fichier peut donc être réutilisé pour une simulation ultérieure (à condition de donner son nom comme paramètre n° 1.3). Il sera ainsi possible de poursuivre une simulation en repartant de l'état résultant, ou bien de réaliser une simulation après une initialisation en régime permanent. Ce fichier peut également être utilisé pour faire un changement de maillage.

3.3 - PARAGRAPHE N° 3 : UNITES DES GRANDEURS [R] OU [TEXTE]

Les unités sont les nombres par lesquels il faut multiplier les données lues (ou éditées) pour les transformer dans le système international S.I. : M.K.S. Tous les résultats sont donnés en unités utilisateurs.

```
3 *** Unites des donnees                                    ***
3.1   [real]=UNITE   (M/S) DES PERMEABILITES
3.2   [real]=DUREE         DES TEMPS            (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
3.3   [real]=UNITE   (M)   DES HAUTEURS VERTICALES ET DES CHARGES
3.4   [text]=DUREE DE REFERENCE DES DEBITS/FLUX (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
3.5   [real]=HAUTEUR (M)   DE L'UNITE DE REFERENCE DEBITS/FLUX/VITESSE
3.6   [real]=UNITE   (M)   DES STOCKS (=M3/M2)
```

Paramètre 3.1 - Unité des perméabilités : pour transformer en m/s [R]

Paramètre 3.2 - Unité des temps [Texte]

Elle est définie par un libellé de trois caractères à choisir parmi les six libellés suivants (en majuscules) :

SEC : seconde
MIN : minute
HEU : heure
JOU : jour
MOI : mois
ANN : année.

Paramètre 3.3 - Unité des altitudes et des charges : pour transformer en m [R]

Paramètres 3.4 et 3.5 - Unité des débits et des flux (hauteur / temps)

Pour faciliter la définition de l'unité des débits (ou flux) on a choisi de définir cette unité sous forme d'une durée de référence (paramètre 3.4) et d'une hauteur de référence (paramètre 3.5). L'unité de débit (par exemple mm/jour) est donc le rapport de la hauteur de référence (par exemple 10^{-3} m) par la durée de référence (par exemple JOU).

Paramètre 3.4 - *Durée de référence pour définir les débits ou flux* : SEC, MIN, HEU, JOU, MOI ou ANN.

Paramètre 3.5 - *Hauteur de référence pour définir les débits ou flux* : pour transformer en m [R]

Paramètre 3.6 - Unité des stocks : pour transformer en m (m^3/m^2) [R]

N.B. : Perméabilité 1 cm/h = $2{,}778\ 10^{-6}$ m/s
Flux, Débit 1 cm/j = $1{,}157\ 10^{-7}$ m/s
1 mm/j = $1{,}157\ 10^{-8}$ m/s
Stock : 1 mm = 10^{-3} m

3.4 - PARAGRAPHE N° 4 : RESOLUTION ET DEFINITION DES LOIS DU SOL

```
4 *** Resolution et Choix des type de Lois de sol      ***
4.1  [integ]=ALLEG. LIST. (0=COMPL 1=ALLEG. 2=TRES ALL. 3=SUPPR -1=DEBUG)
4.2   [real]=DATE DE FIN DE SIMULATION   (0 SI PERMANENT)
4.3   [real]=PAS DE TEMPS DE CALCUL MAXIMUM
4.4   [real]=PAS DE TEMPS DE CALCUL MINIMUM
4.5   [real]=VARIATION MAXIMALE DE VOLUME PENDANT LE PAS DE CALCUL
4.6   [real]=ERREUR DE BILAN MAXIMALE ACCEPTEE (UNITE STOCK)
4.7   [real]=VARIATION MAXIMALE DE CHARGE ENTRE 2 ITERATIONS
4.8   [real]=SUCCION MAXIMALE
4.9   [real]=PERMEABILITE MINIMALE IMPOSEE POUR LE SOL
4.10 [integ]=NOMBRE ITERATIONS A CHAQUE PAS   (VALEUR CONSEILLE=20)
4.11  [real]=COEFICIENT DE RELAXATION (CONSEILLE=0.5 ; [1.0="PAS" RELAX])
4.12 [integ]=LOI RETENTION   [1=HOMOGRAPHIQUE   2=POLYNOMIALE   3=LOGAR.]
4.13 [integ]=LOI PERMEABILITE(PSI) [1=HOMOG  2=PERM(HUMI) 3=EXPONENT. ]
4.14 [integ]=CALCUL DE TRANSFERT DE MASSE (0=NON  1=OUI)
```

Paramètre 4.1 - Allègement du listage [E]

Ce paramètre peut prendre les valeurs suivantes :

0 = Listage complet de toutes les opérations : pour un premier passage ou pour détecter des problèmes ;
1 = Allègement léger ;
2 = Listage allégé ;
3 = Listage supprimé

En cas de convergence très difficile des calculs :

-1 = Déboggage général
-2 = Déboggage entre 2 dates.

Paramètre 4.2 - Date de la fin de la simulation [R]

N.B. : Si on fixe cette date égale à zéro, le calcul sera effectué en régime permanent.

N.B. : La date de début de la simulation sera fixée dans le paragraphe 8 (Etat initial).

Paramètre 4.3 - Durée maximale pour les pas de temps de calcul [R]

Paramètre 4.4 - Durée minimale pour les pas de temps de calcul [R]

Paramètre 4.5 - Variation maximale de stock autorisée dans une maille [R]

Si cette valeur est dépassée le pas de temps prévu sera diminué.

Paramètre 4.6 - Erreur maximale de bilan (en unité de stock) autorisée [R]

Valeur conseillée 1% de la variation de stock totale sur toute la simulation.

Le pas de temps de calcul s'ajuste automatiquement, à chaque instant, entre le pas minimal et le pas maximal en prévoyant de respecter les conditions suivantes :

- Variation de stock dans une maille ne dépassant pas la valeur maximale (paramètre 4.5).
- Erreur de bilan ne dépassant pas l'erreur maximale (paramètre 4.6).

Si à la fin du pas de temps il s'avère que l'erreur de bilan est trop importante - et dans tous les cas quand du ruissellement apparaît sur un sol non saturé - le pas de temps de calcul est repris à partir de la fin du pas précédent avec un pas 8 fois plus petit.

Paramètre 4.7 - Variation maximale de charge entre 2 itérations d'un pas de temps [R]

Le calcul itératif d'un pas de temps s'arrête quand la variation maximale de charge entre 2 itérations ne dépasse pas cette valeur dans toutes les mailles.

Valeur conseillée : environ 1/10 000 de l'amplitude de variation des charges.

Paramètre 4.8 - Succion maximale [R]

C'est la succion maximale qui est autorisée en tout point. Elle correspond par exemple au flétrissement de la végétation. Cette valeur sert à empêcher des charges complètement erronées générant des calculs très instables comme dans le cas décrit dans l'exemple suivant :

Evapotranspiration : 7 mm/j : $Q = 6.10^{8}$ m/s
Sol très sec : perméabilité : $K = 10^{-10}$ m/s

d'où un gradient généralisé : $G = Q/K = 600$

et donc des différences de charges de 600 mètres sur 1 mètre de hauteur.

Valeur conseillée pour ce paramètre : 500 à 1500 cm. Sa valeur n'est pas très critique puisque généralement à de telles succions la perméabilité est quasi nulle.

Paramètre 4.9 - Perméabilité minimale du sol [R]

Cette valeur qui ne sert qu'à éviter des instabilités numériques devrait être de l'ordre de 10^{-13} à 10^{-15} m/s.

Paramètre 4.10 - Nombre maximal d'itérations à chaque pas [E]

C'est le nombre maximal d'itérations (avec réajustement des états à chaque itération) qui ne sera atteint que si l'écart maximal de charge entre 2 itérations est toujours supérieur à la valeur maximale acceptée.

Valeur conseillée : de l'ordre de 15 à 30 itérations.

N.B. : Si les pas de temps sont plus petits le nombre d'itérations peut être notablement réduit.

Paramètre 4.11 - Cœfficient de relaxation des calculs [R]

Dans le cas général la relaxation s'applique sur les succions de 2 itérations successives.

Valeur conseillée : légère relaxation 0,3 à 0,6
forte relaxation 0,1
pas de relaxation 1.

Paramètre 4.12 - Type de loi de rétention (pression-teneur en eau) [E]

1 = loi homographique
2 = loi polynomiale (puissance)
3 = loi logarithmique.

Paramètre 4.13 - Type de loi de perméabilité [E]

1 = loi homographique perméabilité - pression
2 = loi polynomiale perméabilité - teneur en eau
3 = loi exponentielle perméabilité - pression.

Paramètre 4.14 - Transfert de particules [E]

Dans la version 2.0 il n'y a pas de transfert de particules et ce paramètre ne sert qu'à préparer la compatibilité avec les versions futures (3.0 et suivantes).

3.5 - PARAGRAPHE 5 - DESCRIPTION DE CHAQUE COUCHE

```
 5 *** Maillage et Lois caracteristiques du sol        ***
 5.1              << hauteurs des mailles de la couche   1 >>
   [real]    [real]    [real]    [real]    [real]    [real]    [real]    [rea
   [real]    [real]    [real]    [real]    [real]    [real]    [real]    [rea
   [real]    [real]    [real]    [real]    [real]    [real]    [real]    [rea
                  << Caracteristiques du sol    couche   1 >>
                5.2                 5.3                 5.4
PSI 1/2K=     [real];EXPOS K =    [real];PERM SAT=    [real];
PSI T1/2=     [real];EXPOS H =    [real];TETA SAT=    [real];TETA RES=    [rea
                5.5                 5.6                 5.7                  5.
                  << hauteurs des mailles de la couche   2 >>
   [real]     [real]    [real]    [real]
                  << Caracteristiques du sol    couche   2 >>
PSI 1/2K=     [real];EXPOS K =    [real];PERM SAT=    [real];
PSI T1/2=     [real];EXPOS H =    [real];TETA SAT=    [real];TETA RES=    [rea
     $$$ Fin de la definition des couches $$$
```

N.B. : Le logiciel MERINOS Version 2.0 permet de traiter 15 couches au maximum et un nombre total de 300 mailles.

Paramètre 5.1 - Epaisseurs en unité d'altitude des mailles d'une couche (8 valeurs par ligne) [R]

(Mettre juste le nombre nécessaire et suffisant de lignes).

N.B. 1 : Il est conseillé d'avoir un maillage plus fin au sommet de la première couche (la plus haute) et à la base de la dernière couche (la plus basse). En cas d'instabilités, cependant, une maille en surface pas trop fine peut permettre un certain amortissement d'oscillations sans perte de précision importante.

N.B. 2 : Il est tout à fait envisageable de n'utiliser qu'une seule couche homogène.

N.B. 3 : Selon la précision recherchée, la vitesse de réaction, la hauteur totale à simuler, le nombre de mailles devrait être de l'ordre de 15 à 50 soit pour une hauteur totale de 6 à 20 mètres : des mailles de 20 à 50 cm de hauteur en moyenne. Pour un calcul très fin cependant, rien n'empêche par exemple de modéliser une fine tranche de 20 cm de sol avec 40 mailles de 0,5 cm de haut.

Paramètres 5.2 à 5.4 - Paramètres de la loi de perméabilité

Paramètre 5.2 - Pression de demi-perméabilité [R]

Ce paramètre n'est utilisé que pour une loi de perméabilité n° 1 ou n° 3.

Paramètre 5.3 - Exposant de la loi de perméabilité [R]

Cet exposant (positif) est utilisé dans tous les cas sauf pourla loi n° 3.

N.B. : Pour la loi n° 2 sa valeur est de l'ordre de 3 à 8.

Paramètre 5.4 - Perméabilité à saturation [R]

C'est la perméabilité maximale possible.

Paramètres 5.5 à 5.8 - Paramètres de la loi de rétention

Paramètre 5.5 - Pression caractéristique (demi-saturation) [R]

Paramètre 5.6 - Exposant de la loi de rétention [R]

Il est positif. Pour la loi de rétention n° 1, il doit être inférieur à 1 pour respecter la forme de la courbe au voisinage de la saturation.

Paramètre 5.7 - Teneur en eau à saturation [R]

(C'est une teneur en eau - comprise entre 0 et 1 - et non un pourcentage).

Paramètre 5.8 - Teneur en eau résiduelle [R] (même remarque).

3.6 - PARAGRAPHE 6 - CONDITION A LA LIMITE SUPERIEURE

```
6 *** Limite Superieure du sol                                    ***
6.1  [integ]=TYPE          (0=DEBIT ; 1=CHARGE ; 2=HUMID ; 4=PRESSION)
6.2  [integ]=PERIODICITE (0=CONSTANTE ; 1=PAS CONSTANTS    2=DATES FIXES)
6.3  [integ]=INTERPOL.    (0=LINEAIRE    1=INTEG./PALLIERS  2=INTEG/LIN)
6.4   [real]=CONDITION CONSTANTE
6.5   [real]=COTE DE LA SURFACE DU SOL
6.6  [integ]=NOMBRE DE VALEURS DE LIMITES A LIRE EVENTUELL. (0=TOUTES)
6.7   [real]=DUREE DU PAS DE TEMPS DES DONNEES DE LA LIMITE SUPERIEURE
```

Paramètre 6.1 - Type de donnée imposée [E]

0 = Débit (flux) c'est le cas général
1 = Charge
2 = Teneur en eau
3 = Non prévu
4 = Pression

Paramètre 6.2 - Périodicité de cette donnée imposée [E]

0 = Valeur imposée constante ; c'est le cas par exemple :
- ★ d'une infiltration constante
- ★ d'une charge imposée constante (profil de charge)
- ★ d'une pression constante (état quasi stationnaire).

1 = Valeurs données à pas constant dans un fichier externe (paramètre 1.1) (2 500 valeurs au maximum).
C'est le cas général d'un sol alimenté par la pluie.

2 = Valeurs données, dans un fichier externe (paramètre 1.1) pour des dates irrégulières sous forme de couples (date, valeur) (1 250 couples maximum).
C'est le cas général quand on impose à la surface du sol la charge mesurée à certaines dates seulement.

Paramètre 6.3 - Type d'interpolation entre les données [E]

Ce paramètre n'est utilisé que si le paramètre 6.2 n'est pas égal à zéro.

0 = Interpolation linéaire.
C'est le cas général quand on impose des charges.

1 = Intégration constante sur chaque pas de temps.
C'est le cas général pour un flux donné à pas de temps constants. Ce type d'intégration garantit la conservation des volumes échangés.

2 = Intégration par interpolation linéaire.
Ce type d'interpolation, un peu particulier, garantit également la conservation des valeurs échangées mais suppose une variation linéaire du flux d'une date à la suivante. Il permet donc des variations un peu plus douces.

Paramètre 6.4 - Valeur constante imposée [R]

Ce paramètre n'est utilisé que si le paramètre 6.2 a la valeur zéro : c'est-à-dire "condition à la limite constante".

Cette valeur sera suivant le type de données imposées (paramètre 6.1) :

★ la valeur de l'infiltration ou de l'évaporation constante imposée,
★ la valeur de la charge imposée en surface (par exemple 0),
★ la valeur de la teneur en eau mesurée en surface,
★ la valeur de la pression mesurée en surface.

Paramètre 6.5 - Altitude de la face supérieure de la première maille [R]

Valeur la plus classique : zéro (si la première maille est à la surface du sol).

Paramètre 6.6 - Nombre de valeurs de condition à la limite supérieure à lire sur le fichier externe (paramètre 1.1) [E]

N.B. 1 : Si on fixe ce nombre égal à 0, toutes les valeurs du fichier limite supérieure (paramètre 1.1) seront lues.

N.B. 2 : Ce nombre de valeurs n'est utilisé que si le paramètre 6.2 a la valeur 1 ou 2 (condition à la limite non constante).

Paramètre 6.7 - Pas de temps constant des données du fichier des conditions à la limite supérieure [R]

Cette valeur n'est utilisée que si le paramètre 6.2 a la valeur 1 (condition à la limite donnée à pas constants).

3.7 - PARAGRAPHE 7 - CONDITION A LA LIMITE INFERIEURE

```
 7 *** Limite Inferieure du sol                              ***
 7.1  [integ]=TYPE          (0=DEBIT ; 1=CHARG ; 2=HUMID ; 3=GRAD; 4=PRESS)
 7.2  [integ]=PERIODICITE (0=CONSTANTE ; 1=PAS CONSTANTS    2=DATES FIXES)
 7.3  [integ]=INTERPOL.    (0=LINEAIRE    1=INTEG./PALLIERS  2=INTEG/LIN)
 7.4   [real]=CONDITION CONSTANTE
 7.6  [integ]=NOMBRE DE VALEURS DE LIMITES A LIRE EVENTUELL. (0=TOUTES)
 7.7   [real]=DUREE DU PAS DE TEMPS DES DONNEES DE LA LIMITE INFERIEURE
```

Ces paramètres 7.1 à 7.7 ont exactement la même signification que les paramètres 6.1 à 6.7. Le paramètre 7.5, correspondant au paramètre 6.5 (altitude de la surface du sol), n'existe pas. Les valeurs dans le cas général sont cependant le plus souvent différentes.

Paramètre 7.1 - Type de données imposées [E]

0 = débit (flux)

1 = charge : c'est le cas général si on impose par exemple la saturation (présence de la nappe) en bas de la zone modélisée.

2 = teneur en eau.

3 = gradient unitaire : c'est le cas général si on ne modélise qu'une tranche de sol peu épaisse (3 à 5 mètres) en supposant qu'en dessous de cette profondeur le gradient soit pratiquement égal à +1 à tout moment.

4 = pression.

Paramètre 7.2 - Périodicité [E] : cf. paramètre 6.2.

Paramètre 7.3 - Type d'interpolation [E] : cf. paramètre 6.3.

Dans le cas général ce paramètre n'est pas utilisé.

Paramètre 7.4 - Valeur constante imposée [R] : cf. paramètre 6.4.

Cette valeur sera suivant le type de données imposé (paramètre 7.1) :

★ la valeur de la charge imposée au milieu de la maille la plus basse : pour imposer la saturation il suffit de mettre la valeur 9999,

★ la valeur de la teneur en eau,

★ la valeur du gradient unitaire : si le paramètre 7.1 est égal à 3 le gradient (unitaire) est automatiquement pris égal à 1,

★ la valeur de la pression.

Paramètre 7.5 - Ce paramètre n'existe pas.

Il est seulement mentionné ici pour conserver une numérotation analogue à celle du paragraphe 6.

Paramètre 7.6 - Nombre de valeurs à lire [E] : cf. paramètre 6.6.

Paramètre 7.7 - Pas de temps constant des données [R] : cf. paramètre 6.7.

REMARQUE : Il n'est pas autorisé - et c'est numériquement impossible - d'imposer en REGIME PERMANENT un flux (constant) en haut et en bas. Il est évident que si le flux est le même la solution est triviale : si le flux est différent il n'y a pas de solution. Dans le cas où on impose, en régime permanent, un flux à la surface supérieure, et un gradient unitaire en bas, le logiciel imposera en fait à tout moment en bas la charge qui conduira à un gradient unitaire, c'est-à-dire à un débit égal à la perméabilité.

3.8 - PARAGRAPHE N° 8 - ETAT INITIAL DANS LES MAILLES

```
8 *** Etat initial au debut des calculs                    ***
8.1    [real]=DATE DU DEBUT SIMULATION
8.2   [integ]=TYPE      (0=TENEUR/EAU  ; 1=CHARGE ; 2=PRESSION)
8.3   [integ]=INTRODUC (0=CONST ; 1=PROFIL H ou HUM ; 2=coupl (Z,H ou HUM)
8.4    [real]=CONDITION CONSTANTE
```

Paramètre 8.1 - Date du début de simulation [R]

C'est la date à laquelle débute la simulation. Si les conditions initiales sont lues sur un fichier externe (profils), c'est la date qui sera lue dans ce fichier externe (paramètre 1.3) qui définira la date du début de simulation et oblitèrera ce paramètre 8.1.

Paramètre 8.2 - Type d'état initial [E]

0 = teneur en eau
1 = charge
2 = pression.

Paramètre 8.3 - Manière d'introduire l'état initial

0 = Etat initial constant dans toutes les mailles :
- ★ teneur en eau constante : si le paramètre 8.2 vaut 0.
- ★ charge constante : si le paramètre 8.2 vaut 1.
- ★ pression constante : si le paramètre 8.2 vaut 2.

1 = Profil lu pour les centres de chaque maille :
- ★ profil de teneur en eau : si le paramètre 8.2 vaut 0.
- ★ profil de charge : si le paramètre 8.2 vaut 1.

N.B. : il s'agit bien de charges et non de pressions.
Ce profil sera lu sur un fichier externe (paramètre 1.3). Il résultera d'un fichier "état final" (paramètre 1.6) ou d'un profil d'un fichier "profil" (paramètre 1.5) car ces 3 fichiers ont exactement la même structure.

2 ou 3 = Couples de points (altitude, charge) ou (altitude, teneur en eau).
Il s'agit ici non plus d'un profil, avec une valeur au centre de chaque maille, mais d'une succession de points (altitude, charge) ou (altitude, teneur en eau) lue sur un fichier externe (paramètre 1.3). Les valeurs calculées au centre des mailles sont alors obtenues automatiquement par interpolation linéaire. Il est donc conseillé de donner des couples encadrant totalement l'altitude minimale et l'altitude maximale.

N.B. 1 : Quand le paramètre 8.3 vaut 1 (profil) ou 2 (couples de points), il s'agit de charges (et non de pressions) ou de teneurs en eau. En effet aucun fichier de couples (altitude, pression) n'est prévu.

N.B. 2 : Ces couples de valeurs (altitude, charge) seront lus sur un fichier externe (paramètre 1.3). Cette option du paramètre 8.3 permet de réaliser un changement de maillage à partir de calculs précédents car ce fichier a exactement la même structure qu'un fichier état final (paramètre 2.6) ou qu'un fichier profil (paramètre 2.5).
Si le paramètre vaut 3, les couples seront lus en format libre 1 couple par ligne.

Paramètre 8.4 - Valeur de l'état initial constant [R]

Ce paramètre n'est utilisé que si le paramètre 8.2 a la valeur zéro (état initial constant pour toutes les mailles). Cette valeur sera :

★ la teneur en eau constante : si le paramètre 8.2 vaut 0.
★ la charge constante : si le paramètre 8.2 vaut 1.
★ la pression constante : si le paramètre 8.2 vaut 2.

N.B. : Si on impose une charge égale à 9999 on impose en fait une condition de saturation, c'est-à-dire une charge égale à la profondeur.

REMARQUE : C'est la date lue dans ce fichier externe (paramètre 1.3) qui est utilisée pour définir automatiquement la date de début de la simulation. (Elle oblitère la valeur du paramètre 8.1). Il faut donc en tenir compte.
Par exemple, on fait une première simulation de la date 0 à la date 365 j. Si après l'avoir renommé en état initial on repart de l'état final (daté 365 j.) pour refaire la même simulation (donc jusqu'à la date 365 j.) les calculs s'arrêtent immédiatement au premier pas de temps car la date 365 j. est atteinte. Dans ce cas, il faut :

* ou bien redéfinir la date du fichier état initial (paramètre 2.5) à la valeur zéro (c'est la méthode conseillée qui peut se faire en conversationnel) ;
* ou bien corriger la date de fin de simulation (paramètre 4.2) et la fixer à 730 j.

3.9 - PARAGRAPHE 9 - STOCK PARTIEL

```
9 *** Limites d'une tranche pour un Stock partiel      ***
9.1   [real]=ALTITUDE DU HAUT DE LA TRANCHE
9.2   [real]=ALTITUDE DU BAS  DE LA TRANCHE
```

La tranche de sol qui est simulée doit être comprise entre 2 altitudes pour lesquelles on connaît les conditions aux limites : par exemple de la surface du sol jusqu'à la nappe ou jusqu'à une profondeur à laquelle on peut estimer qu'on observe un gradient unitaire à tout instant. Les mesures des teneurs en eau sont souvent disponibles sur une tranche plus faible : par exemple jusqu'à 2 mètres de profondeur seulement. Le modèle permet de calculer également, à chaque date, le stock en eau entre 2 altitudes pour le comparer aux mesures correspondantes.

Paragraphe 9.1 - Altitude du haut de la tranche [R]

Paragraphe 9.2 - Altitude du bas de la tranche [R]

(Rappelons que les altitudes sont comptées négativement à partir du zéro à la cote du sol).

Le stock en eau sera calculé par intégration des teneurs en eau calculées entre ces deux altitudes (qui n'ont pas besoin de coincider avec des centres ou des limites de mailles).

3.10 - PARAGRAPHE 10 - CONTROLE DES EDITIONS DE BILANS ET DE PROFILS

```
10 *** Editions Regulieres de Bilans et de Profils     ***
10.1  [integ]=NOMBRE DE PAS DE CALCULS ENTRE EDITIONS DE BILANS (Listing)
10.2   [real]=DUREE MAXIMALE ECOULEE   ENTRE EDITIONS DE BILANS (Listing)
10.3  [integ]=NOMBRE DE PAS DE CALCULS ENTRE EDITIONS DE PROFILS
10.4   [real]=DUREE MAXIMALE ECOULEE   ENTRE EDITIONS DE PROFILS
```

Paragraphe 10.1 - Nombre de pas de calculs entre les éditions détaillées de bilans sur le fichier de listage [E]

Paragraphe 10.2 - Durée maximale écoulée entre les éditions de bilans [R]

Les éditions de bilans détaillées sur fichier liste (quand le fichier liste n'est pas supprimé : paramètre 4.1 inférieur à 3) se font chaque fois que la condition 10.1 ou la condition 10.2 n'est pas respectée c'est-à-dire : un nombre de pas de temps trop grand sans édition ou bien une durée trop grande sans édition.

N.B. : Les bilans de chaque date sont toujours édités à chaque pas sur le fichier bilans (paramètre 2.4).

Paragraphe 10.3 - Nombre de pas de calculs entre les éditions de profils [E]

Paragraphe 10.4 - Durée maximale écoulée entre les éditions de profils [R]

Les paramètres 10.3 et 10.4 ont les mêmes significations que les paramètres 10.1 et 10.2 mais ils se rapportent à l'édition des profils : sur le fichier profils (paramètre 2.5) et sur le fichier listage.

3.11 - PARAGRAPHE N° 11 - EDITION DE PROFILS A DATES FIXES IRREGULIERES

```
11 *** Editions de Profils a dates Fixes               ***
11.1 [real]    [real]    [real]
```

Prélèvement 11.1 - Liste des dates fixes (irrégulières) pour lesquelles on demande l'édition d'un profil [R]. (500 dates maximum).

Ces profils sont édités dans le fichier profil (paramètre 2.5).

3.12 - PARAGRAPHE N° 12 - HISTORIQUES DES ETATS DANS CERTAINES MAILLES

```
12 *** Numeros des mailles a historique                ***
12.1 [integ]   [integ]   [integ]   [integ]   [integ]
```

Paramètre 12.1 - Liste des numéros des mailles pour lesquelles sera édité un historique des états [E]

N.B. : La maille supérieure est la maille n° 1 ; les historiques seront édités sur le fichier externe décrit par le paramètre 2.3.

4 - INITIALISATION DU MODELE

Compte tenu des perméabilités dans la zone non saturée, qui sont généralement faibles, un sol a généralement une forte inertie et son état dépend pendant longtemps des conditions initiales. Il est donc nécessaire d'essayer de déterminer au mieux ces conditions initiales.

En pratique, on choisira une des méthodes suivantes :

★ sol en équilibre sous l'influence de conditions aux limites constantes, (régime permanent)

★ état résultant d'une simulation d'une longue période avec des conditions aux limites réellement observées (par exemple une année de pluies infiltrées).

N.B. 1 : Ces deux méthodes peuvent s'enchaîner : mise en équilibre sommaire en régime permanent puis simulation d'une longue période à partir de cet équilibre.

N.B. 2 : Dans le doute il vaut mieux partir d'un sol plutôt trop humide que trop sec. En effet, un sol trop humide a une forte perméabilité. Il se drainera très vite. Un sol trop sec, très peu perméable, sera très long à se mettre en équilibre.

En pratique, dans le cas d'un sol homogène, avec certaines lois de perméabilité, il existe une solution d'équilibre analytique pour un flux d'injection constant : voir 5ème partie paragraphe 1. Pour un prélèvement constant il y a une solution d'équilibre seulement si le prélèvement n'est pas trop grand compte tenu de la profondeur de la nappe (on ne peut pas imposer un gradient unitaire).

Pour se mettre en équilibre on fixera par exemple une faible infiltration constante (ne pas dépasser par exemple 1 mm/j qui correspond à 365 mm/an). On choisira comme condition initiale une valeur constante (par exemple une teneur en eau à saturation ou à demi-saturation). En fixant une date de fin de calcul égale à zéro on obtiendra un régime permanent. Le fichier "état final" généré peut alors être utilisé comme fichier "condition initiale" pour un calcul d'initialisation avec une longue série de conditions à la limite supérieure :

Exemple : On veut simuler un sol soumis à la pluie et à l'ETP pendant la période 1990-1992.

★ Si on dispose aussi des pluies et ETP de l'année 1989 : on commence les calculs au 1/1/89 à partir de l'état d'équilibre. A partir de 1/1/1990 on considérera que le système ne dépend plus de l'état d'équilibre choisi initialement.

★ Si on ne dispose pas des pluies et ETP de l'année 1989 on commencera par un calcul d'un an avec l'année 1990 (par exemple). On reprendra alors comme condition initiale l'état final calculé au 31/12/1990 et on simulera alors la période 1990-1992.

CALCUL DU FLUX A INTRODUIRE A LA LIMITE SUPERIEURE (SURFACE DU SOL)

Pour utiliser le modèle MERINOS il faut le plus souvent disposer du flux à la surface du sol, résultant de la pluie et de l'évapotranspiration potentielle (ETP). A partir de données journalières de pluies et de données décadaires ou mensuelles d'ETP le préprocesseur MERIFLUX permet de calculer et de mettre en forme le flux journalier sous la forme de la différence algébrique Pluie - ETP. L'ETP décadaire ou mensuelle est transformée en ETP journalière par simple division par le nombre de jours de la décade ou du mois. Les données d'entrée sont aux formats des données hydrologiques du département EAU du BRGM. L'évapotranspiration potentielle peut être calculée avec le logiciel ETPTURC selon la formule de Turc à partir de la température de l'air, de la durée de l'insolation et de l'humidité relative de l'air. L'ETP Penman peut également être calculée par le logiciel ETPEN.

Il convient de remarquer que le flux calculé qui est exprimé en mm/jour n'est pas le flux qui sera introduit dans le sol, mais le flux potentiel qui sera injecté ou prélevé si l'état du sol le permet.

5 - DESCRIPTION DES FICHIERS D'ENTREE

Voir un exemple au paragraphe 7.

5.1 - FICHIER LIMITE SUPERIEURE (paramètre 1.1)

Il peut être au choix d'un des deux types suivants : à pas constants ou à dates fixes (irrégulières).

Fichier à pas constants :

Il est de la forme : 1 ligne titre suivie de données séquentielles : 12 valeurs par ligne, 6 caractères par valeur.

Un tel fichier peut être constitué par le préprocesseur MERIFLUX ou le préprocesseur BORHYDRO.

Fichier à dates fixes (irrégulières) :

Il est constitué par une ligne titre suivie de couples (altitude, valeur) en "format libre digitalisation" (c'est-à-dire 2 fois 15 caractères). 1 couple par ligne.

5.2 - FICHIER LIMITE INFERIEURE (paramètre 1.2)

Il a exactement la même forme que le fichier limite supérieure.

5.3 - FICHIER ETAT INITIAL

Il est défini par une ligne titre suivie par des triplets (altitude, charge, teneur en eau). Chaque triplet sur une ligne, 10 caractères par valeur. Ce fichier sera généralement constitué automatiquement en tant que fichier état final d'une simulation précédente.

6 - DESCRIPTION DES FICHIERS DE RESULTATS

Voir un exemple au paragraphe 7.

6.1 - FICHIER LISTE OU LISTING (paramètre 2.1)

La présence et la quantité d'informations qui figurent dans ce fichier sont contrôlées par le paramètre 4.1.

Selon les valeurs de ce paramètre le fichier liste peut être allégé ou même supprimé. Dans sa version la plus complète, le fichier contient une trace des paramètres lus et des fichiers lus. Il fait apparaître également à chaque pas de temps sélectionné les informations suivantes :

Flux supérieurs et inférieurs

FLUX SUP LU : Débit superficiel lu (en moyenne pendant le pas de temps).

FLUX SUP MODELE : Débit imposé en surface (compte tenu de l'état de saturation du sol, donc de sa perméabilité et du gradient de charge).

FLUX RUISSEL : Débit de ruissellement obtenu par éventuelle différence entre un débit superficiel lu, supérieur au débit superficiel imposé par l'état du sol.

Q SUPERIEUR CAL : Débit superficiel calculé :

* Si on impose un débit dans la maille de surface : le terme Q SUPERIEUR CAL doit être égal au débit imposé, à condition que la convergence des calculs soit suffisante.

* Si on impose une charge (ou une teneur en eau dans la maille de surface : le terme Q SUPERIEUR CAL est le débit qu'il faut apporter (ou prélever) pour assurer cette charge ou cette teneur en eau.

N.B. : Les 3 termes : FLUX SUP LU, FLUX SUP MODELE et Q SUPERIEUR CAL sont positifs pour un débit infiltré et négatifs pour un débit prélevé (évapotranspiré).

FLUX BAS MODELE : Débit imposé dans la maille la plus basse.

Q INFERIEUR CAL : Débit calculé dans la maille la plus basse. Comme précédemment, si on impose un débit en bas (ce qui est rare) on retrouve ce débit si la convergence des calculs est suffisante ; si on impose une charge, une teneur en eau ou un gradient unitaire, ce terme est le débit qui s'écoule (généralement vers le bas) sous l'influence de cette condition imposée.

N.B. : FLUX BAS MODELE et Q INFERIEUR CAL sont positifs pour un débit quittant la maille du bas, c'est-à-dire pour un débit de recharge de la nappe.

Volumes échangés dans le pas de temps (en unité de stock)

VOLUME ECHANGE :

PAR LE HAUT : Volume échangé par le haut (positif pour un débit infiltré).

PAR LE BAS : Volume échangé par le bas (positif pour une recharge de la nappe).

DIFF STOCK : Différence entre le stock en fin de pas de temps et le stock en début de pas.

ECART : Ecart bilan pendant le pas (doit être très inférieur au "chiffre d'affaires" c'est-à-dire à la somme de termes positifs ou des termes négatifs).

Volumes échangés cumulés

La définition est la même que dans le fichier "Historique de bilans".

Débits résiduels

SOM ABS Q RESID : Somme des valeurs absolues des débits résiduels de toutes les mailles.

SOM ABS QRESI FIN : Somme des valeurs absolues des débits résiduels de toutes les mailles : compte tenu également du fait que la capacité capillaire en fin d'itérations est différente de celle prévue à l'itération précédente.

Ecarts maximaux entre les 2 dernières itérations (et numéro de la maille correspondante)

Ecart maximal de charge.
Ecart maximal de débit (à la face supérieure d'une maille).
Ecart maximal de teneur en eau.
Ecart maximal de capacité capillaire.
Ecart maximal de perméabilité.
Débit résiduel (final) maximal.

Profil (aux dates sélectionnées) :

ALTITUDE : Altitude du centre de la maille.

CHARGE : Charge en fin de pas.

PRESSION : Pression en fin de pas.

HUMIDITE : Teneur en eau en fin de pas.

DEBIT HAUT : Débit à la face supérieure de la maille.

D.STOCK : Variation de stock constatée dans la maille.

D.STO PREV : Variation de stock prévue à l'itération précédente (à partir de la capacité capillaire) calculée à l'avant-dernière itération).

QRESID Débit résiduel dans la maille calculé à partir de la variation de stock prévue (à partir de la capacité capillaire de stock prévue à partir de la dernière itération).

QRESID FIN : Débit résiduel final calculé par différence.

PERM BAS : Perméabilité équivalente entre la maille et la maille inférieure.

N.B. : ★ Les différences de stocks sont divisées par la durée du pas de temps et exprimées en unité de débit.

★ La perméabilité équivalente est également exprimée en unité de débit (car c'est le débit qui s'écoulerait sous un gradient unitaire).

6.2 - FICHIER HISTORIQUE DES LIMITES (paramètre 2.2)

C'est un fichier constitué de 13 colonnes (chacune de 10 caractères).

DATE : Date de la fin du pas de temps.

DT : Durée du pas de temps.

H HAUT : Charge dans la maille de surface (n° 1).

H BAS : Charge dans la maille du bas.

Q LU : Débit lu pour la limite supérieure (quand on impose un débit). Il s'agit de la moyenne sur la durée du pas de temps.

Q RUISS : Débit de ruissellement calculé.

Q HAUT : Débit calculé dans la maille de surface (n° 1) (positif pour un débit rentrant donc une infiltration).

Q BAS : Débit calculé dans la maille du bas. Si on modélise toute l'épaisseur de la zone non saturée, c'est le débit de recharge de la nappe. Il est positif pour un débit sortant donc pour une recharge (ce qui est le cas général).

STOCK : Stock total en fin de pas.

STO PART. : Stock partiel dans la tranche définie par les paramètres 9.1 et 9.2.

P FL NUL : Altitude du plan de flux nul.

ECART BIL : Ecart de bilan pendant le pas de temps. L'écart de bilan, exprimé en débit est la différence entre les débits entrants, sortants et la variation de stock.

ER CUMU : Erreur de bilan cumulée depuis le début de la simulation. Cette erreur cumulée est exprimée en unité de stock.

N.B. : Tous les débits sont les débits moyens pendant la durée du pas de temps.

6.3 - FICHIER HISTORIQUE DE MAILLES (paramètre 2.3)

Ce fichier comporte successivement, pour toutes les mailles choisies dans les paramètres 12, un tableau de 6 colonnes.

DATE : Date de fin de pas.

DT : Durée du pas.

H : Charge en fin de pas.

h : Pression en fin de pas (on rappelle qu'avec les conventions choisies on a toujours en dehors de la saturation : PRESSION = (CHARGE - ALTITUDE).
Pression, charge et altitude sont généralement toutes négatives.

HUMIDITE : Teneur en eau.

DEBIT-HAU : Débit à travers la face supérieure de la maille (positif = entrant).

6.4 - FICHIER HISTORIQUE DES BILANS (paramètre 2.4)

C'est un fichier constitué de 9 colonnes (chacune sur 10 caractères).

Toutes les valeurs sont exprimées en unité de stock et cumulées depuis le début de la simulation.

DATE : C'est la date de la fin du pas de temps.

P-ETP : Somme de tous les flux (potentiels) imposés, quand ils sont positifs. C'est la somme des apports potentiels.

ETP : Somme de tous les flux (potentiels) imposés, quand ils sont négatifs. C'est la somme des prélèvements potentiels.

RUISS : Volume ruisselé calculé.

ETR : Volume prélevé à travers la limite supérieure. Il est au plus égal au terme ETP (si la convergence du modèle est assurée). Le terme ETR est inférieur quand le prélèvement potentiel est trop élevé (compte tenu de l'état du sol) et conduirait à des succions trop grandes). Dans tous les cas ce terme ETR désigne l'ETR COMPLEMENTAIRE de l'ETP prélevée directement dans la pluie et donc prise en compte dans le terme P-ETP.

INFILT : Volume infiltré à travers la limite supérieure. Il est au plus égal au terme P-ETP (si la convergence du modèle est assurée). Le terme INFILT est inférieur quand la perméabilité du sol et le gradient de charge ne permettent pas d'infiltrer un volume égal à P-ETP. Il apparaît alors un ruissellement (colonne RUISS).

AL. NAP. : Volume de recharge de la nappe (à travers la limite inférieure). Un volume négatif indiquerait une alimentation de la zone non saturée à partir du bas.

VAR. STO. : Variation de stock depuis le début de simulation.

ERR. BILAN : Erreur de bilan cumulée depuis le début de la simulation.

N.B. : On rappelle que quand on impose un flux à la surface du sol (condition limite supérieure) il s'agit de la grandeur algébrique PLUIE-ETP, c'est-à-dire :

★ d'un apport **potentiel** égal à la pluie diminuée de l'ETP du pas : si la pluie est supérieure à l'ETP.

★ ou bien d'un prélèvement **potentiel** égal à l'ETP (Evapotranspiration potentielle) diminuée de la pluie du pas : si l'ETP est supérieure à la pluie.

6.5 - FICHIER PROFILS (paramètre 2.5)

Ce fichier contient un certain nombre de profils (aux dates sélectionnées par l'utilisateur).

Chaque fichier contient 4 colonnes (sur 10 caractères chacune).

ALTITUDE : Altitude du centre d'une maille. Rappelons que les altitudes sont positives vers le haut. Si l'altitude de la surface du sol est fixée à zéro -comme c'est généralement le cas- toutes les altitudes seront généralement négatives. La surface du sol peut cependant être fixée à n'importe quelle cote.

CHARGE : Charge à la date du profil.

HUMIDITE : Teneur en eau à la date du profil.

DEBIT HAUT : Débit à la surface supérieure de la maille (positif = entrant).

6.6 - FICHIER ETAT FINAL (paramètre 2.6)

Il a la même structure que le fichier profil. Il donne l'état en fin de simulation (il ne comporte pas la colonne débit).

7 - EXEMPLES D'UTILISATION

7.1 - SITE DE MEZIERES

La figure 1 présente le fichier des paramètres pour la simulation en conditions naturelles du site de Mézières. Ce fichier de nom MEZIERES.MER a été généré par le préprocesseur BORDENOS. La durée du calcul est de 1 097 jours (3 ans) avec des pas qui s'ajustent entre $\frac{1}{3}$ de jour et 3 jours. La variation maximale de volume au cours d'un pas est de 2 millimètres et l'erreur de bilan maximale acceptable est de 0.2 mm. Le processus itératif s'arrête si dans chaque maille les charges varient de moins de 10^{-8} mm entre 2 itérations. Le nombre maximal d'itérations a été fixé à 40 et le coefficient de relaxation à 0.2 (c'est-à-dire une importante sous relaxation). La loi de rétention est une loi homographique et la loi de perméabilité est une loi puissance en fonction de la teneur en eau.

On modélise une tranche de sol de 615 cm composée de 5 couches ayant chacune des lois différentes. Ces couches ont respectivement pour épaisseur : 65, 20, 40, 100 et 390 cm. Au total le modèle fait intervenir 19 mailles.

Le flux en surface est constitué d'un fichier journalier de différence pluie-ETP (puisque le ruissellement est négligeable sur ce sol sableux). Ce fichier de nom MEZIERES.FLU a été généré par le préprocesseur MERIFLUX. Les données sont à pas de temps constants (égaux à 1 jour) et l'interpolation, suivant les pas de calcul, se fait par intégration par paliers. La figure 2a reproduit le début de ce fichier de flux. La valeur n° 1 correspond au flux du jour n° 1 de 0 heure à 24 heures, c'est-à-dire de la date absolue 0 à la date absolue 1.

La figure 2b présente un exemple de fichier de conditions aux limites à dates fixes de nom MEZIERES.FLC.

A la limite inférieure, on impose un gradient unitaire, puisque à 6 mètres de profondeur les charges varient peu et le gradient est très peu différent de 1 (1 mètre de charge pour 1 mètre de profondeur).

L'état initial a été lu, sous forme de charges initiales, sur le fichier profil de nom "MEZIERES.INI" (figure 2c) (la condition constante 7 10^{-2} n'est donc pas prise en compte). Ce fichier résulte d'une initialisation par MERINOS.

On s'intéresse à une tranche de sol comprise entre les profondeurs 20 et 240 centimètres, pour laquelle on dispose de mesures de charges et de teneurs en eau.

On demande d'éditer les profils (de charge, de teneur en eau, de débits) tous les 30 jours et on s'intéresse aux historiques de charge des mailles n° 3, 6, 8, 11, 16 et 19 soit aux profondeurs respectives : 20, 75, 115, 205, 440 et 590 cm.

Les figures 3 à 6 présentent des extraits de fichiers :

MEZIERES.LIM = valeurs calculées aux limites
MEZIERES.BIL = cumuls des termes du bilan
MEZIERES.MAI = historiques des mailles
MEZIERES.LST = listing de contrôle.

On n'a pas représenté les fichiers MEZIERES.PRO (profils) ni MEZIERES.FIN (état final) puisqu'ils ont exactement la même structure que le fichier MEZIERES.INI (état initial). Les résultats de la simulation ont été illustrés par tracés graphiques -avec le post-processur GRECO- à partir des fichiers MEZIERES.LIM et MEZIERES.BIL. On a ainsi représenté sur les 3 années de la période 1978-1980 l'évolution des données suivantes.

★ charge en surface
★ flux de ruissellement
★ stock total sur toute la tranche
★ stock partiel (de 20 à 240 cm de profondeur)
★ altitude du premier plan de flux nul
★ flux de recharge
★ cumul de l'excédent P-ETP
★ cumul de l'évapotranspiration réelle reprise du sol
★ cumul de l'infiltration
★ cumul de la recharge.

Ces évolutions sont reproduites sur les figures 7 à 8.

7.2 - AUTRES EXEMPLES D'UTILISATION

Les figures 9 à 12 présentent d'autres fichiers paramètres à titre d'illustration :

★ écoulement en charge : figure 9
★ drainage interne : figure 10
★ débit imposé en surface : figure 11
★ évaporation en surface : figure 12.

Les figures 13 et 14 présentent la simulation d'un drainage interne :

★ stocks cumulés figure 13
★ évolution temps-profondeur : débits d'échange et teneur en eau figure 14.

```
SITE EXPERIMENTAL DE MEZIERES (BRGM) MERINOS 5 COUCHES
*** Nom des eventuels fichiers donnees Entree   2.0 ***
Fichier prevu LIMITE SUP     :MEZIERES.FLU
Fichier prevu LIMITE INF     :
Fichier prevu ETAT INIT.     :MEZIERES
*** Noms des fichiers de Resultats                  ***
Fichier LISTING              :MEZIERES
Fichier HISTORIQUE LIMIT     :MEZIERES
Fichier HISTORIQUE MAILL     :MEZIERES
Fichier HISTORIQUE BILAN     :MEZIERES
Fichier PROFILS CALCULES     :MEZIERES
Fichier ETAT FINAL           :MEZIERES
*** Unites des donnees                              ***
       1-UNITE   (M/S) DES PERMEABILITES
     JOU-DUREE         DES TEMPS            (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
     1-2-UNITE   (M)   DES HAUTEURS VERTICALES ET DES CHARGES
     JOU-DUREE DE REFERENCE DES DEBITS/FLUX (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
     1-3-HAUTEUR (M)   DE L'UNITE DE REFERENCE DEBITS/FLUX/VITESSE
     1-3-UNITE   (M)   DES STOCKS (=M3/M2)
*** Resolution et Choix des type de Lois de sol     ***
       3-ALLEG. LIST. (0-COMPL 1-ALLEG. 2-TRES ALL. 3-SUPPR.  -1-DEBUG)
    1097-DATE DE FIN DE SIMULATION   (0 SI PERMANENT)
       3-PAS DE TEMPS DE CALCUL MAXIMUM
   0.333-PAS DE TEMPS DE CALCUL MINIMUM
       2-VARIATION MAXIMALE DE VOLUME PENDANT LE PAS DE CALCUL
     0.2-ERREUR DE BILAN MAXIMALE ACCEPTEE (UNITE STOCK)
     1-8-VARIATION MAXIMALE DE CHARGE ENTRE 2 ITERATIONS
     500-SUCCION MAXIMALE
    1-15-PERMEABILITE MINIMALE IMPOSEE POUR LE SOL
      40-NOMBRE ITERATIONS A CHAQUE PAS   (VALEUR CONSEILLE-20)
     0.2-COEFICIENT DE RELAXATION (CONSEILLE=0.5 ; [1.0-"PAS" RELAX])
       1-LOI RETENTION   [1-HOMOGRAPHIQUE   2-POLYNOMIALE   3-LOGARIT.]
       2-LOI PERMEABILITE(PSI) [1-HOMOG  2-PERM(HUMI) 3-EXPONENTIELLE ]
*** Maillage et Lois caracteristiques du sol        ***
                 << hauteurs des mailles de la couche   1 >>
       5        10        10        20        20
                 << Caracteristiques du sol    couche   1 >>
PSI 1/2K-         0;EXPOS K =      5.37;PERM SAT=       2-7;
PSI T1/2-     24.93;EXPOS H =     1.367;TETA SAT=     0.135;TETA RES=       6-2
                 << hauteurs des mailles de la couche   2 >>
      20
                 << Caracteristiques du sol    couche   2 >>
PSI 1/2K-         0;EXPOS K =      5.33;PERM SAT=       2-7;
PSI T1/2-     15.68;EXPOS H =     0.626;TETA SAT=    0.1575;TETA RES=    0.1125
                 << hauteurs des mailles de la couche   3 >>
      20        20
                 << Caracteristiques du sol    couche   3 >>
PSI 1/2K-         0;EXPOS K =      5.54;PERM SAT=       2-7;
PSI T1/2-        12;EXPOS H =       0.6;TETA SAT=     0.195;TETA RES=      0.15
                 << hauteurs des mailles de la couche   4 >>
      30        30        40
                 << Caracteristiques du sol    couche   4 >>
PSI 1/2K-         0;EXPOS K =      5.34;PERM SAT=       2-7;
PSI T1/2-        12;EXPOS H =       0.6;TETA SAT=     0.185;TETA RES=     0.125
                 << hauteurs des mailles de la couche   5 >>
      40        50        50        50        50        50        50        50
                 << Caracteristiques du sol    couche   5 >>
PSI 1/2K-         0;EXPOS K =      5.34;PERM SAT=       2-7;
PSI T1/2-        12;EXPOS H =       0.6;TETA SAT=     0.125;TETA RES=     0.115
    $$$ Fin de la definition des couches $$$
*** Limite Superieure du sol                       ***
       0-TYPE        (0-DEBIT ; 1-CHARGE ; 2-TENEUR EN EAU ; 4-PRESSION)
       1-PERIODICITE (0-CONSTANTE ; 1-PAS CONSTANTS    2-DATES FIXES)
       1-INTERPOL.   (0-LINEAIRE    1-INTEG./PALLIERS  2-INTEG/LIN)
       0-CONDITION CONSTANTE
       0-COTE DE LA SURFACE DU SOL
    1097-NOMBRE DE VALEURS DE LIMITES A LIRE EVENTUELL. (0-TOUTES)
       1-DUREE DU PAS DE TEMPS DES DONNEES DE LA LIMITE SUPERIEURE
*** Limite Inferieure du sol                        ***
       3-TYPE        (0-DEBIT ; 1-CHARG ; 2-TENEUR/EAU; 3-GRAD; 4-PRESS)
       0-PERIODICITE (0-CONSTANTE ; 1-PAS CONSTANTS    2-DATES FIXES)
       0-INTERPOL.   (0-LINEAIRE    1-INTEG./PALLIERS  2-INTEG/LIN)
    9999-CONDITION CONSTANTE
       0-NOMBRE DE VALEURS DE LIMITES A LIRE EVENTUELL. (0-TOUTES)
       1-DUREE DU PAS DE TEMPS DES DONNEES DE LA LIMITE INFERIEURE
*** Etat initial au debut des calculs              ***
       0-DATE DU DEBUT SIMULATION
       1-TYPE     (0-TENEUR/EAU  ; 1-CHARGE ; 2-PRESSION)
       1-INTRODUC (0-CONST ; 1-PROFIL H ou HUMI ; 2-couples (Z,H ou HUM)
     7-2-CONDITION CONSTANTE
*** Limites d'une tranche pour un Stock partiel    ***
     -20-ALTITUDE DU HAUT DE LA TRANCHE
    -240-ALTITUDE DU BAS  DE LA TRANCHE
*** Editions Regulieres de Bilans et de Profils    ***
       1-NOMBRE DE PAS DE CALCULS ENTRE LES EDITIONS DE BILANS (Listing)
    1000-DUREE MAXIMALE ECOULEE   ENTRE LES EDITIONS DE BILANS (Listing)
     500-NOMBRE DE PAS DE CALCULS ENTRE LES EDITIONS DE PROFILS
   10000-DUREE MAXIMALE ECOULEE   ENTRE LES EDITIONS DE PROFILS
*** Editions de Profils a dates Fixes              ***
      30        60        90       120       150       180       210       240
     270       300       330       360       395       425       455       485
     515       545       575       605       635       665       695       725
     760       790       820       850       880       910       940       970
    1000      1030      1060      1090
*** Numeros des mailles a historique               ***
       3         6         8        11        16        19
*** Fin bordereau MERINOS 2.0                      ***
```

Figure 1 - Logiciel MERINOS. Fichier paramètres site de MEZIERES

```
FLUX P-ETP BRICY (POUR MEZIERES)        1978/1983 MM/J
-0.177-0.277 2.323 4.823-0.277-0.277-0.277-0.277 0.023 0.623 15.72 3.623      1
-0.277-0.277-0.277-0.277 1.723-0.277 3.923-0.277-0.277 4.823 13.22 14.72      2
 2.523 1.023 1.723 7.823 1.023 0.923 3.223 5.696 0.196-0.404 3.096 0.796      3
 2.896 0.196-0.404-0.204-0.404-0.404 4.896-0.104-0.104 4.896 4.496 0.296      4
 24.50 6.796 0.496 0.896-0.404-0.104 3.096 8.596 1.496 4.496 8.196-0.277      5
 5.523 6.323-0.877 -1.28 -1.28 -1.28 -1.28 -1.28 -1.28 -1.28-0.377 -1.28      6
 0.423 13.72 7.923 -1.08 -1.28 5.623 2.923-0.577 8.923 14.72-0.877 4.823      7
```

a - Fichier MEZIERES.FLU : flux supérieur donné à pas de temps réguliers (12 valeurs séquentielles par ligne) (N.B. la figure ne donne que les valeurs des 84 premiers jours)

```
FLUX P-ETP BRICY (POUR MEZIERES) 1978/1983 MM/J (DATES,VALEURS)
          0.        -0.177
          1.        -0.177
       1.01        -0.277
          2.        -0.277
       2.01         2.323
          3.         3.323
       3.01         4.823
          4.         4.823
       4.01        -0.277
          5.        -0.277
       5.01        -0.277
          6.        -0.277
       6.01        -0.277
          7.        -0.277
```

b - Fichier MEZIERES.FLC : flux supérieur donné par couples (date, flux) (non utilisé dans l'exemple)

```
SITE EXPERIMENTAL DE MEZIERES (BRGM) MERINOS 5 COUCHES
ALTITUDE    CHARGE  HUMIDITE DEBIT HAU  No DATE=     0.000  (Pas de Temps:   0)
   -2.50    -10.78    0.1118-0.177        1
  -10.00    -18.56    0.1115  2.44        2
  -20.00    -28.94    0.1109  2.31        3
  -35.00    -44.46    0.1103  2.19        4
  -55.00    -65.09    0.1095  1.99        5
  -75.00    -85.98    0.1412  1.79        6
  -95.00   -107.38    0.1719 0.763        7
 -115.00   -128.77    0.1699 0.264        8
 -140.00   -154.99    0.1495 0.179        9
 -170.00   -185.71    0.1484 0.131       10
 -205.00   -221.03    0.1479 0.108       11
 -245.00   -260.75    0.1189 0.105       12
 -290.00   -304.90    0.1191 0.124       13
 -340.00   -353.41    0.1195 0.189       14
 -390.00   -401.53    0.1202 0.346       15
 -440.00   -449.38    0.1210 0.729       16
 -490.00   -497.28    0.1220  1.62       17
 -540.00   -554.51    0.1192 0.751       18
 -590.00   -616.32    0.1171 3.410E-02   19
```

c - Fichier MEZIERES.INI : état initial dans les 19 mailles

Figure 2 - Logiciel MERINOS. Fichiers d'entrée : exemple de fichiers de flux supérieur et d'état initial

SITE EXPERIMENTAL DE MEZIERES (BRGM) MERINOS 5 COUCHES (HYD SEULEMENT)

DATE	PAS TPS	H HAUT	H BAS	Q LU	QRUIS	Q HAUT	Q BAS	STOCK	STO PART.	P FL NUL	ECART BIL	ER CUMU
0.000	0.000	-10.78	-616.32	0.000	0.000	0.000	0.000	783.541	312.915	-2.50	0.00	0.00
0.333	0.333	-15.91	-616.08	-0.177	0.000	-0.040	0.013	783.515	313.423	-2.50	0.01	0.01
0.804	0.471	-20.78	-615.42	-0.177	0.000	-0.111	0.028	783.484	313.929	-2.50	-0.03	-0.03
1.470	0.666	-26.92	-612.44	-0.248	0.000	-0.239	0.028	783.333	314.415	-2.50	-0.03	-0.05
2.411	0.941	-21.17	-605.27	0.858	0.000	0.856	0.125	784.039	315.118	-2.50	-0.02	-0.07
3.243	0.832	-11.49	-602.04	3.054	0.000	3.061	0.410	786.198	316.376	-2.50	0.05	-0.03
4.420	1.177	-9.83	-601.19	3.001	0.000	2.985	0.578	788.998	318.987	-2.50	0.05	0.03
5.030	0.610	-17.79	-601.16	-0.277	0.000	-0.145	0.573	788.576	319.756	-2.50	-0.02	0.01

Fichier MEZIERES.LIM : valeur calculée aux limites et états instantanés

SITE EXPERIMENTAL DE MEZIERES (BRGM) MERINOS 5 COUCHES (HYD SEULEMENT)

DATE	P-ETP	ETP	RUISS	ETR	INFILT	AL. NAP.	VAR. STO.	ERR BILAN
0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.333	0.00	0.06	0.00	0.01	0.02	0.00	-0.03	0.01
0.804	0.00	0.14	0.00	0.07	0.02	0.02	-0.06	-0.03
1.470	0.00	0.31	0.00	0.22	0.02	0.04	-0.21	-0.05
2.411	0.81	0.31	0.00	0.22	0.83	0.15	0.50	-0.07
3.243	3.35	0.31	0.00	0.22	3.38	0.50	2.66	-0.03
4.420	6.88	0.31	0.00	0.22	6.89	1.18	5.46	0.03
5.030	6.88	0.48	0.00	0.31	6.89	1.52	5.04	0.01

Fichier MEZIERES.BIL : cumul des termes du bilan

SITE EXPERIMENTAL DE MEZIERES (BRGM) MERINOS 5 COUCHES (HYD SEULEMENT)

HISTORIQUE DE LA MAILLE : 3 A LA COTE : -20.000

DATE	PAS TPS	CHARGE	PRESSION	HUMIDIT	DEB SUP
0.000	0.000	-28.94	-8.94	0.1109	0.000
0.333	0.333	-29.57	-9.57	0.1101	1.695
0.804	0.471	-31.24	-11.24	0.1081	1.076
1.470	0.666	-34.09	-14.09	0.1052	0.600
2.411	0.941	-35.93	-15.93	0.1036	0.675
3.243	0.832	-32.66	-12.66	0.1066	1.732
4.420	1.177	-28.98	-8.98	0.1109	2.564
5.030	0.610	-30.38	-10.38	0.1091	1.444

HISTORIQUE DE LA MAILLE : 6 A LA COTE : -75.000

DATE	PAS TPS	CHARGE	PRESSION	HUMIDIT	DEB SUP
0.000	0.000	-85.98	-10.98	0.1412	0.000
0.333	0.333	-85.04	-10.04	0.1427	1.966
0.804	0.471	-84.07	-9.07	0.1442	2.088
1.470	0.666	-84.03	-9.03	0.1443	1.879
2.411	0.941	-84.96	-9.96	0.1428	1.517
3.243	0.832	-85.49	-10.49	0.1420	1.386
4.420	1.177	-85.31	-10.31	0.1423	1.566
5.030	0.610	-85.14	-10.14	0.1425	1.649

HISTORIQUE DE LA MAILLE : 8 A LA COTE : -115.000

. . .

. . . etc

Fichier MEZIERES.MAI : Historique des états de certaines mailles

Figure 3 - Logiciel MERINOS. Fichiers résultants : exemple de fichiers limite, bilan et historique

```
                SITE EXPERIMENTAL DE MEZIERES (BRGM) MERINOS 5 COUCHES

*******************************************************************************
  Vous avez utilise :
 MEZIERESHYD.MER                          Comme Fichier de PARAMETRE
*******************************************************************************
  Vous avez Cree    :
 MEZIERES.LST                               - Fichier LISTING General
 MEZIERES.LIM                               - Fichier Historique des LIMITES
 MEZIERES.MAI                               - Fichier Historique des MAILLES
 MEZIERES.BIL                               - Fichier Historique des BILANS
 MEZIERES.PRO                               - Fichier Profil
 MEZIERES.FIN                               - Fichier Etat Final


*******************************************************************************
      Vous avez Defini
(pour une utilisation eventuelle) :
 FLUX7883.DAT                             Comme Fichier de Limite SUPERIEURE
 MERINOS.INF                              Comme Fichier de Limite INFERIEURE
 DIRACMEZ.INI                             Comme Fichier de conditions INITIALES
*******************************************************************************
 1.000E+00 -UNITES DES PERMEABILITES          EN M/S
 8.640E+04 -UNITES DES TEMPS                  EN S
 1.000E-02 -UNITES DES VERTICALES (Z,PSI,..) EN M
 1.157E-08 -UNITES DES DEBITS                 EN M3/S/M2-M/S
 1.000E-03 -UNITES DES STOCKS                 EN M3/M2-M
```

** CARACTERISTIQUES HYDRIQUES DU SOL **

MAILLE	Succ 1/2 K	exposant K	K Sat.	succ 1/2 sat	expo. Teta	TETA Sat,	TETA Res.
1	0.000E+00	5.37	2.000E-07	24.9	1.37	0.135	6.000E-02
2	0.000E+00	5.37	2.000E-07	24.9	1.37	0.135	6.000E-02
3	0.000E+00	5.37	2.000E-07	24.9	1.37	0.135	6.000E-02
4	0.000E+00	5.37	2.000E-07	24.9	1.37	0.135	6.000E-02
5	0.000E+00	5.37	2.000E-07	24.9	1.37	0.135	6.000E-02
6	0.000E+00	5.33	2.000E-07	15.7	0.626	0.157	0.112
7	0.000E+00	5.54	2.000E-07	12.0	0.600	0.195	0.150
8	0.000E+00	5.54	2.000E-07	12.0	0.600	0.195	0.150
9	0.000E+00	5.34	2.000E-07	12.0	0.600	0.185	0.125
10	0.000E+00	5.34	2.000E-07	12.0	0.600	0.185	0.125
11	0.000E+00	5.34	2.000E-07	12.0	0.600	0.185	0.125
12	0.000E+00	5.34	2.000E-07	12.0	0.600	0.125	0.115
13	0.000E+00	5.34	2.000E-07	12.0	0.600	0.125	0.115
14	0.000E+00	5.34	2.000E-07	12.0	0.600	0.125	0.115
15	0.000E+00	5.34	2.000E-07	12.0	0.600	0.125	0.115
16	0.000E+00	5.34	2.000E-07	12.0	0.600	0.125	0.115
17	0.000E+00	5.34	2.000E-07	12.0	0.600	0.125	0.115
18	0.000E+00	5.34	2.000E-07	12.0	0.600	0.125	0.115
19	0.000E+00	5.34	2.000E-07	12.0	0.600	0.125	0.115

Figure 4 - Logiciel MERINOS. Fichier MEZIERES.LST ; extraits du listing : index des fichiers, unités et paramètres hydrodynamiques

CONDITIONS INITIALES

No	ALTITUD	EPAIS	CHARGE	PRESSION	HUMID
1	-2.5	5.0	-10.8	-8.3	0.112
2	-10.0	10.0	-18.6	-8.6	0.111
3	-20.0	10.0	-28.9	-8.9	0.111
4	-35.0	20.0	-44.5	-9.5	0.110
5	-55.0	20.0	-65.1	-10.1	0.109
6	-75.0	20.0	-86.0	-11.0	0.141
7	-95.0	20.0	-107.4	-12.4	0.172
8	-115.0	20.0	-128.8	-13.8	0.170
9	-140.0	30.0	-155.0	-15.0	0.150
10	-170.0	30.0	-185.7	-15.7	0.148
11	-205.0	40.0	-221.0	-16.0	0.148
12	-245.0	40.0	-260.8	-15.8	0.119
13	-290.0	50.0	-304.9	-14.9	0.119
14	-340.0	50.0	-353.4	-13.4	0.120
15	-390.0	50.0	-401.5	-11.5	0.120
16	-440.0	50.0	-449.4	-9.4	0.121
17	-490.0	50.0	-497.3	-7.3	0.122
18	-540.0	50.0	-554.5	-14.5	0.119
19	-590.0	50.0	-616.3	-26.3	0.117

No	ALTITUD	EPAIS	CHARGE	PRESSION	HUMID

DATE : 0.0000 Pas de Temps : 0 (DUREE = 0.0000) (Iterations: 0)

FLUX SUP LU= -0.177 ; FLUX RUISSELL = 0.000E+00 ;
FLUX SUP MODELE= -0.177 ; FLUX BAS MODELE= 0.000E+00 ;

TEMPS = 0.0000 (PAS no : 0)
(Diff de Stock et Permeabilites exprimes en unites de Debits [LT-1])

ALTITUD.	CHARGE	PRESSION	HUMID	DEBIT HAUT	D. STOCK	D.STO PREV	QRESID	QRESI FIN	PERM BAS	N
-2.5	-10.8	-8.3	0.112	-0.177	0.000E+00	0.000E+00	2.44	2.44	2.35	1
-10.0	-18.6	-8.6	0.111	2.44	0.000E+00	0.000E+00	-0.127	-0.127	2.22	2
-20.0	-28.9	-8.9	0.111	2.31	0.000E+00	0.000E+00	-0.122	-0.122	2.11	3
-35.0	-44.5	-9.5	0.110	2.19	0.000E+00	0.000E+00	-0.196	-0.196	1.93	4
-55.0	-65.1	-10.1	0.109	1.99	0.000E+00	0.000E+00	-0.204	-0.204	1.71	5
-75.0	-86.0	-11.0	0.141	1.79	0.000E+00	0.000E+00	-1.02	-1.02	0.713	6
-95.0	-107.4	-12.4	0.172	0.763	0.000E+00	0.000E+00	-0.499	-0.499	0.247	7
-115.0	-128.8	-13.8	0.170	0.264	0.000E+00	0.000E+00	-8.540E-02	-8.540E-02	0.170	8
-140.0	-155.0	-15.0	0.150	0.179	0.000E+00	0.000E+00	-4.788E-02	-4.788E-02	0.128	9
-170.0	-185.7	-15.7	0.148	0.131	0.000E+00	0.000E+00	-2.233E-02	-2.233E-02	0.107	10
-205.0	-221.0	-16.0	0.148	0.108	0.000E+00	0.000E+00	-3.315E-03	-3.315E-03	0.106	11
-245.0	-260.8	-15.8	0.119	0.105	0.000E+00	0.000E+00	1.921E-02	1.921E-02	0.127	12
-290.0	-304.9	-14.9	0.119	0.124	0.000E+00	0.000E+00	6.481E-02	6.481E-02	0.195	13
-340.0	-353.4	-13.4	0.120	0.189	0.000E+00	0.000E+00	0.157	0.157	0.359	14
-390.0	-401.5	-11.5	0.120	0.346	0.000E+00	0.000E+00	0.383	0.383	0.762	15
-440.0	-449.4	-9.4	0.121	0.729	0.000E+00	0.000E+00	0.894	0.894	1.69	16
-490.0	-497.3	-7.3	0.122	1.62	0.000E+00	0.000E+00	-0.872	-0.872	0.656	17
-540.0	-554.5	-14.5	0.119	0.751	0.000E+00	0.000E+00	-0.717	-0.717	2.758E-02	18
-590.0	-616.3	-26.3	0.117	3.410E-02	0.000E+00	0.000E+00	-3.410E-02	-3.410E-02	0.000E+00	19

ALTITUD.	CHARGE	PRESSION	HUMID	DEBIT HAUT	D. STOCK	D.STO PREV	QRESID	QRESI FIN	PERM BAS	N

Diff de Stock=Difference de Stock en Unites de Debits
D.STO PREV =Difference de Stock prevus (d'apres la capacite capill.)
Permeabilites=Permeabilite equivalente en Unites de Debits [LT-1]
QRESID =Debit residuel prevu (precision calculs)
QRESI FIN =Debit residuel constate (du aussi a variation de capacite capill.

Figure 5 - Logiciel MERINOS. Fichier MEZIERES.LST ; extraits du listing : état initial

```
 DATE :     0.3330  Pas de Temps  :    1 (DUREE =     0.3330 )   (Iterations:  10)
FLUX SUP     LU= -0.177     ; FLUX RUISSELL  =  0.000E+00 ;
FLUX SUP MODELE= -0.177     ; FLUX BAS MODELE=  0.000E+00 ;
Q SUPERIEUR CAL= -3.954E-02 ; Q INFERIEUR CAL=  1.295E-02 ;

VOLUMES ECHANGES * DANS LE PAS DE TEMPS *
PAR LE HAUT    = -1.317E-02 ; PAR LE BAS     =  4.312E-03 ; DIFF STOCK     = -2.570E-02 ; ECART=  8.218E-03

            VOLUMES ECHANGES * CUMULE *:
    P-ETP      ETP     RUISS       ETR    INFILT   AL. NAP.  VAR. STO. ERR BILAN
    0.00      0.06      0.00      0.01      0.02      0.00     -0.03      0.01
Somme des valeurs absolues des debits Resid Prevus=  0.941
Somme des valeurs absolues des debits Resid Finaux=  0.943
  Entre les 2 dernieres iterations :
Ecart Maximal de Charge       =-0.1283       Maille No    1
Ecart Maximal de Debit (sup)  = 0.1375       Maille No    1
Ecart Maximal de Teneur en eau= 7.7285E-05    Maille No    2
Ecart Maximal de Capacite     = 2.8108E-09    Maille No   11
Ecart Maximal de Permeabilite =-9.7316E-11    Maille No    1
Debit Residuel Maximal        =-0.1696       Maille No   18
       (cad erreur de stock =-5.6475E-02)
 DATE :     0.8039  Pas de Temps  :    2 (DUREE =     0.4709 )   (Iterations:  10)
FLUX SUP     LU= -0.177     ; FLUX RUISSELL  =  0.000E+00 ;
FLUX SUP MODELE= -0.177     ; FLUX BAS MODELE=  0.000E+00 ;
Q SUPERIEUR CAL= -0.111     ; Q INFERIEUR CAL=  2.761E-02 ;

VOLUMES ECHANGES * DANS LE PAS DE TEMPS *
PAR LE HAUT    = -5.248E-02 ; PAR LE BAS     =  1.300E-02 ; DIFF STOCK     = -3.125E-02 ; ECART= -3.423E-02

            VOLUMES ECHANGES * CUMULE *:
    P-ETP      ETP     RUISS       ETR    INFILT   AL. NAP.  VAR. STO. ERR BILAN
    0.00      0.14      0.00      0.07      0.02      0.02     -0.06     -0.03
Somme des valeurs absolues des debits Resid Prevus=  1.10
Somme des valeurs absolues des debits Resid Finaux=  1.09
  Entre les 2 dernieres iterations :
Ecart Maximal de Charge       =-0.1223       Maille No    1
Ecart Maximal de Debit (sup)  = 6.5537E-02    Maille No    1
Ecart Maximal de Teneur en eau= 8.8826E-05    Maille No    7
Ecart Maximal de Capacite     = 2.8105E-09    Maille No   18
Ecart Maximal de Permeabilite =-5.2236E-11    Maille No    1
Debit Residuel Maximal        = 0.2721       Maille No   17
       (cad erreur de stock = 0.1281    )
            . . . .
            . . . .
            . . . .   a la fin :

** Nombre total d'Iterations      =     102          **

**  (duree totale de la simulation =      3.00 sec.) **

**  (soit pour chaque iteration    =    0.0294 sec.) **
```

Figure 6 - Logiciel MERINOS. Fichier MEZIERES.LST ; extraits du listing : deux premiers pas de calcul

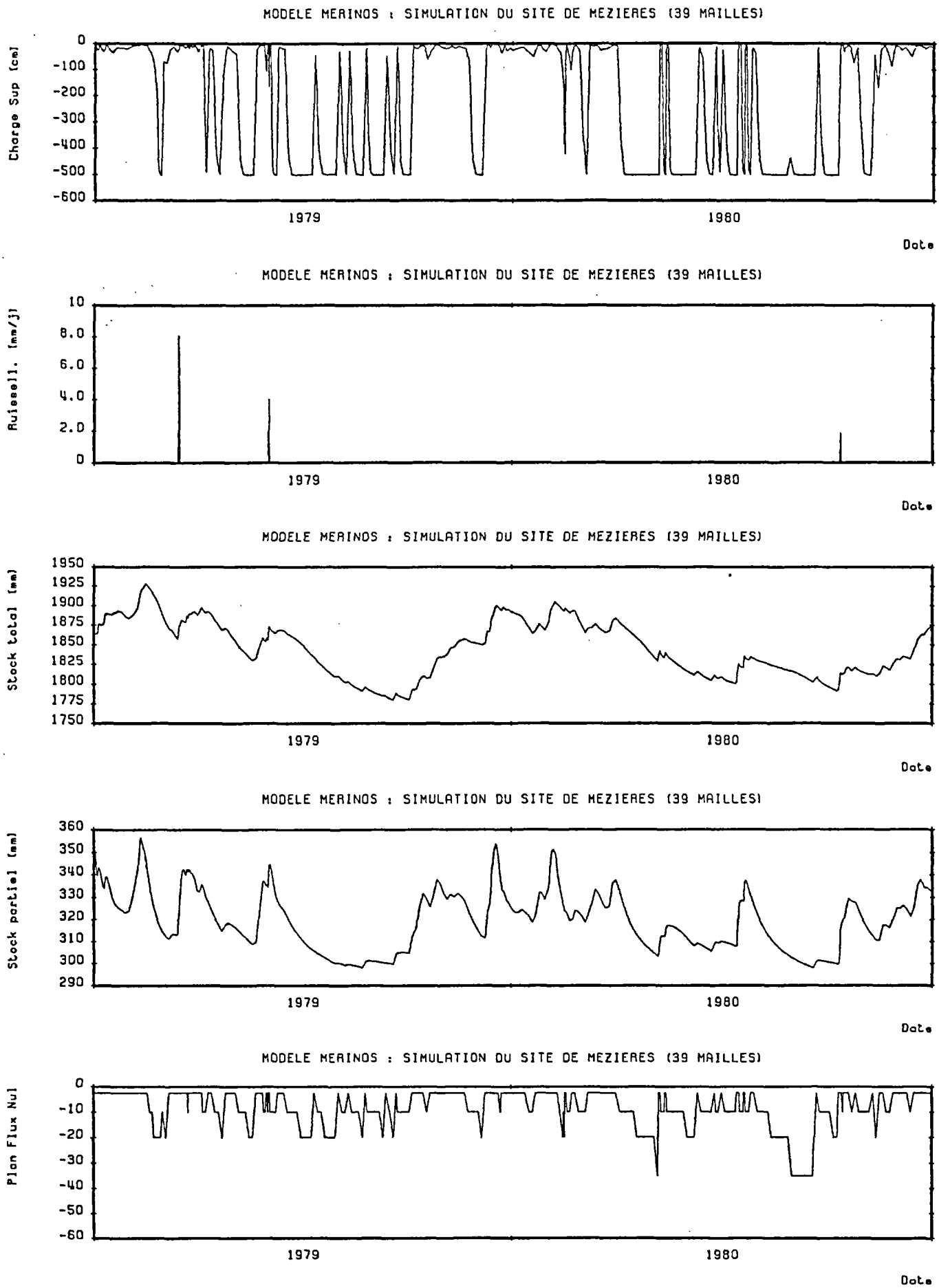


Figure 7 - Logiciel MERINOS. Site de Mézières. Evolution des variables calculées

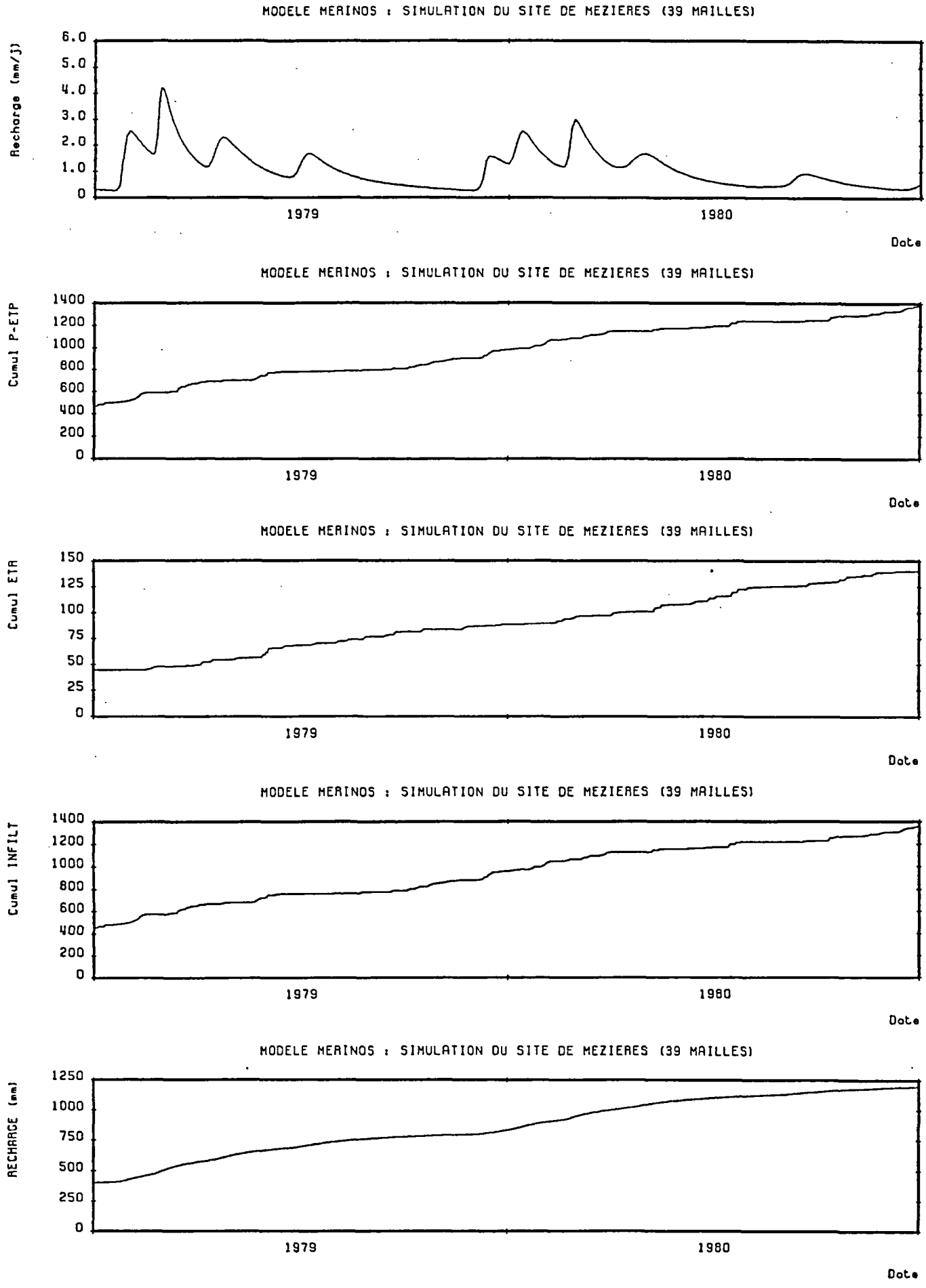


Figure 8 - Logiciel MERINOS. Site de Mézières. Evolution des variables calculées (suite)

```
ESSAI MERINOS  EN CHARGE REEL
*** Nom des eventuels fichiers donnees Entree   2.0 ***
Fichier prevu LIMITE SUP    :
Fichier prevu LIMITE INF    :
Fichier prevu ETAT INIT.    :
*** Noms des fichiers de Resultats                  ***
Fichier LISTING             : ESSAICH2.LST
Fichier HISTORIQUE LIMIT    : ESSAICH2.LIM
Fichier HISTORIQUE MAILL    : ESSAICH2.MAI
Fichier HISTORIQUE BILAN    : ESSAICH2.BIL
Fichier PROFILS CALCULES    : ESSAICH2.PRO
Fichier ETAT FINAL          : ESSAICH2.FIN
*** Unites des donnees                             ***
       1=UNITE   (M/S) DES PERMEABILITES
     JOU=DUREE         DES TEMPS           (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
     1-2=UNITE   (M)   DES HAUTEURS VERTICALES ET DES CHARGES
     JOU=DUREE DE REFERENCE DES DEBITS/FLUX (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
     1-3=HAUTEUR (M)   DE L'UNITE DE REFERENCE DEBITS/FLUX/VITESSE
     1-3=UNITE   (M)   DES STOCKS (=M3/M2)
*** Resolution et Choix des type de Lois de sol     ***
       0=ALLEG. LIST. (0=COMPL 1=ALLEG. 2=TRES ALL. 3=SUPPR.  -1=DEBUG)
      30=DATE DE FIN DE SIMULATION   (0 SI PERMANENT)
       3=PAS DE TEMPS DE CALCUL MAXIMUM
   0.333=PAS DE TEMPS DE CALCUL MINIMUM
       2=VARIATION MAXIMALE DE VOLUME PENDANT LE PAS DE CALCUL
     0.2=ERREUR DE BILAN MAXIMALE ACCEPTEE (UNITE STOCK)
     1-8=VARIATION MAXIMALE DE CHARGE ENTRE 2 ITERATIONS
     500=SUCCION MAXIMALE
    1-15=PERMEABILITE MINIMALE IMPOSEE POUR LE SOL
      20=NOMBRE ITERATIONS A CHAQUE PAS   (VALEUR CONSEILLE=20)
     0.3=COEFICIENT DE RELAXATION (CONSEILLE=0.5 ; [1.0="PAS" RELAX])
       1=LOI RETENTION   [1=HOMOGRAPHIQUE   2=POLYNOMIALE   3=LOGARIT.]
       2=LOI PERMEABILITE(PSI) [1=HOMOG  2=PERM(HUMI) 3=EXPONENTIELLE ]
*** Maillage et Lois caracteristiques du sol        ***
                 << hauteurs des mailles de la couche   1 >>
      10        10        10        10        10        10        10        10
      10        10        10        10        10        10        10        10
      10        10        10        10        10        10        10        10
      10        10        10        10        10        10
                 << Caracteristiques du sol    couche   1 >>
PSI 1/2K=         0;EXPOS K =         5;PERM SAT=       1-6;
PSI T1/2=       200;EXPOS H =       0.6;TETA SAT=      0.35;TETA RES=       5-2
    $$$ Fin de la definition des couches $$$
*** Limite Superieure du sol                       ***
       1=TYPE        (0=DEBIT ; 1=CHARGE ; 2=TENEUR EN EAU ; 4=PRESSION)
       0=PERIODICITE (0=CONSTANTE ; 1=PAS CONSTANTS    2=DATES FIXES)
       0=INTERPOL.   (0=LINEAIRE    1=INTEG./PALLIERS  2=INTEG/LIN)
    -295=CONDITION CONSTANTE
       0=COTE DE LA SURFACE DU SOL
    1096=NOMBRE DE VALEURS DE LIMITES A LIRE EVENTUELL. (0=TOUTES)
       1=DUREE DU PAS DE TEMPS DES DONNEES DE LA LIMITE SUPERIEURE
*** Limite Inferieure du sol                       ***
       1=TYPE        (0=DEBIT ; 1=CHARG ; 2=TENEUR/EAU; 3=GRAD; 4=PRESS)
       0=PERIODICITE (0=CONSTANTE ; 1=PAS CONSTANTS    2=DATES FIXES)
       0=INTERPOL.   (0=LINEAIRE    1=INTEG./PALLIERS  2=INTEG/LIN)
    -295=CONDITION CONSTANTE
       0=NOMBRE DE VALEURS DE LIMITES A LIRE EVENTUELL. (0=TOUTES)
       1=DUREE DU PAS DE TEMPS DES DONNEES DE LA LIMITE INFERIEURE
*** Etat initial au debut des calculs              ***
       0=DATE DU DEBUT SIMULATION
       2=TYPE     (0=TENEUR/EAU  ; 1=CHARGE ; 2=PRESSION)
       0=INTRODUC (0=CONST ; 1=PROFIL H ou HUMI ; 2=couples (Z,H ou HUM)
    -200=CONDITION CONSTANTE
*** Limites d'une tranche pour un Stock partiel    ***
       0=ALTITUDE DU HAUT DE LA TRANCHE
    -250=ALTITUDE DU BAS  DE LA TRANCHE
*** Editions Regulieres de Bilans et de Profils    ***
       1=NOMBRE DE PAS DE CALCULS ENTRE LES EDITIONS DE BILANS (Listing)
    1000=DUREE MAXIMALE ECOULEE   ENTRE LES EDITIONS DE BILANS (Listing)
     500=NOMBRE DE PAS DE CALCULS ENTRE LES EDITIONS DE PROFILS
    1000=DUREE MAXIMALE ECOULEE   ENTRE LES EDITIONS DE PROFILS
*** Editions de Profils a dates Fixes              ***
       1         2         3         4         5         6         7         8
       9        10        11        12        13        14        15        16
      17        18        19        20        21        22        23        24
      25        26        27        28        29        30
*** Numeros des mailles a historique               ***
       1         5        10        15        20
*** Fin bordereau MERINOS 2.0                      ***
```

Figure 9 - Logiciel MERINOS. Fichier paramètres pour simuler un écoulement en charge pendant 30 jours

```
ESSAI MERINOS  DRAINAGE INTERNE
*** Fichiers de donnees Entree                2.0 ***
Fichier LIMITE SUP (Facult.):
Fichier LIMITE INF (Facult.):
Fichier CONDIT INI (Facult.):
*** Fichiers de donnees Sortie                    ***
Fichier LISTING           : ESSAIDRA1.LST
Fichier HISTORIQUE LIMITES  : ESSAIDRA1.LIM
Fichier HISTORIQUE MAILLES  : ESSAIDRA1.MAI
Fichier HISTORIQUE BILANS   : ESSAIDRA1.BIL
Fichier PROFILS CALCULES    : ESSAIDRA1.PRO
Fichier ETAT FINAL          : ESSAIDRA1.FIN
*** Unites des donnees                           ***
       1-UNITE   (M/S) DES PERMEABILITES
     JOU-DUREE         DES TEMPS          (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
     1-2-UNITE   (M)   DES HAUTEURS VERTICALES ET DES CHARGES
     JOU-DUREE DE REFERENCE DES DEBITS/FLUX (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
     1-3-HAUTEUR (M)   DE L'UNITE DE REFERENCE DES DEBITS (OU FLUX)
     1-3-UNITE   (M)   DES STOCKS (=M3/M2)
*** Resolution et Choix des type de Lois de sol   ***
       0-ALLEG. LIST. (0-COMPL 1-ALLEG. 2-TRES ALL. 3-SUPPR.  -1-DEBUG)
      50-DATE DE FIN DE SIMULATION   (0 SI PERMANENT)
       3-PAS DE TEMPS DE CALCUL MAXIMUM
   0.333-PAS DE TEMPS DE CALCUL MINIMUM
       2-VARIATION MAXIMALE DE VOLUME PENDANT LE PAS DE CALCUL
     0.2-ERREUR DE BILAN MAXIMALE ACCEPTEE (UNITE STOCK)
     1-8-VARIATION MAXIMALE DE CHARGE ENTRE 2 ITERATIONS
     500-SUCCION MAXIMALE
    1-15-PERMEABILITE MINIMALE IMPOSEE POUR LE SOL
      20-NOMBRE ITERATIONS A CHAQUE PAS   (VALEUR CONSEILLE=20)
     0.3-COEFICIENT DE RELAXATION (CONSEILLE=0.5 ; [1.0="PAS" RELAX])
       1-LOI RETENTION   [1=HOMOGRAPHIQUE   2-POLYNOMIALE   3-LOGARIT.]
       2-LOI PERMEABILITE(PSI) [1-HOMOG  2-PERM(HUMI) 3-EXPONENTIELLE ]
*** Maillage et Lois caracteristiques du sol      ***
             << hauteurs des mailles de la couche   1 >>
       5        5        5        5        5        5        5        5
       5        5        5        5        5        5        5        5
       5        5        5        5        5        5        5        5
       5        5        5        5        5        5        5        5
       5        5        5        5        5        5        5        5
       5        5        5        5        5        5        5        5
       5        5        5        5        5        5        5        5
       5        5        5        5
             << Caracteristiques du sol    couche   1 >>
PSI 1/2K=         0;EXPOS K =         5;PERM SAT=       1-6;
PSI T1/2=        20;EXPOS H =       0.6;TETA SAT=      0.15;TETA RES=       5-2
    $$$ Fin de la definition des couches $$$
*** Limite Superieure du sol                     ***
       0-TYPE         (0-DEBIT     ; 1-CHARGE         ; 2-TENEUR EN EAU)
       0-PERIODICITE (0-CONSTANTE ; 1-PAS CONSTANTS    2-DATES FIXES)
       1-INTERPOL.   (0-LINEAIRE    1-INTEG./PALLIERS  2-INTEG/LIN)
       0-CONDITION CONSTANTE
       0-COTE DE LA SURFACE DU SOL
    1096-NOMBRE DE VALEURS DE LIMITES A LIRE EVENTUELL. (0-TOUTES)
       1-DUREE DU PAS DE TEMPS DES DONNEES DE LA LIMITE SUPERIEURE
*** Limite Inferieure du sol                      ***
       3-TYPE         (0-DEBIT     ; 1-CHARGE         ; 2-TENEUR  3-GRAD)
       0-PERIODICITE (0-CONSTANTE ; 1-PAS CONSTANTS    2-DATES FIXES)
       0-INTERPOL.   (0-LINEAIRE    1-INTEG./PALLIERS  2-INTEG/LIN)
    9999-CONDITION CONSTANTE
       0-NOMBRE DE VALEURS DE LIMITES A LIRE EVENTUELL. (0-TOUTES)
       1-DUREE DU PAS DE TEMPS DES DONNEES DE LA LIMITE INFERIEURE
*** Etat initial au debut des calculs            ***
       0-DATE DU DEBUT SIMULATION
       0-TYPE          (0-TENEUR EAU ; 1-CHARGE OU PRESSION)
       0-INTRODUCTION (0-CONSTANTE  ; 1-PROFIL H ou HUMI ; 2-couples H(Z)
    0.14-CONDITION CONSTANTE
*** Limites d'une tranche pour un Stock partiel   ***
       0-ALTITUDE DU HAUT DE LA TRANCHE
    -250-ALTITUDE DU BAS  DE LA TRANCHE
*** Editions Regulieres de Bilans et de Profils   ***
       1-NOMBRE DE PAS DE CALCULS ENTRE LES EDITIONS DE BILANS (Listing)
    1000-DUREE MAXIMALE ECOULEE   ENTRE LES EDITIONS DE BILANS (Listing)
     500-NOMBRE DE PAS DE CALCULS ENTRE LES EDITIONS DE PROFILS
    1000-DUREE MAXIMALE ECOULEE   ENTRE LES EDITIONS DE PROFILS
*** Editions de Profils a dates Fixes            ***
      10       20       30       40       50
*** Numeros des mailles a historique             ***
       1        5       10       15       20       25       30       35
      40       45       50       55
*** Fin bordereau MERINOS 2.0                    ***
```

Figure 10 - Logiciel MERINOS. Fichier paramètres pour simuler un drainage interne pendant 50 jours

```
ESSAI MERINOS Q IMPOSE EN SURFACE= 120 MM/J
*** Nom des eventuels fichiers donnees Entree   2.0 ***
Fichier prevu LIMITE SUP    :
Fichier prevu LIMITE INF    :
Fichier prevu ETAT INIT.    :
*** Noms des fichiers de Resultats                  ***
Fichier LISTING             : ESSAIINJ.LST
Fichier HISTORIQUE LIMIT    : ESSAIINJ.LIM
Fichier HISTORIQUE MAILL    : ESSAIINJ.MAI
Fichier HISTORIQUE BILAN    : ESSAIINJ.BIL
Fichier PROFILS CALCULES    : ESSAIINJ.PRO
Fichier ETAT FINAL          : ESSAIINJ.FIN
*** Unites des donnees                              ***
       1-UNITE   (M/S) DES PERMEABILITES
     JOU-DUREE         DES TEMPS          (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
     1-2-UNITE   (M)   DES HAUTEURS VERTICALES ET DES CHARGES
     JOU-DUREE DE REFERENCE DES DEBITS/FLUX (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
     1-3-HAUTEUR (M)   DE L'UNITE DE REFERENCE DEBITS/FLUX/VITESSE
     1-3-UNITE   (M)   DES STOCKS (=M3/M2)
*** Resolution et Choix des type de Lois de sol     ***
       0-ALLEG. LIST. (0-COMPL 1-ALLEG. 2-TRES ALL. 3-SUPPR.  -1-DEBUG)
      22-DATE DE FIN DE SIMULATION   (0 SI PERMANENT)
       1-PAS DE TEMPS DE CALCUL MAXIMUM
     5-2-PAS DE TEMPS DE CALCUL MINIMUM
       2-VARIATION MAXIMALE DE VOLUME PENDANT LE PAS DE CALCUL
     0.2-ERREUR DE BILAN MAXIMALE ACCEPTEE (UNITE STOCK)
     1-8-VARIATION MAXIMALE DE CHARGE ENTRE 2 ITERATIONS
     500-SUCCION MAXIMALE
    1-15-PERMEABILITE MINIMALE IMPOSEE POUR LE SOL
      20-NOMBRE ITERATIONS A CHAQUE PAS   (VALEUR CONSEILLE=20)
     0.3-COEFICIENT DE RELAXATION (CONSEILLE=0.5 ; [1.0="PAS" RELAX])
       1-LOI RETENTION   [1=HOMOGRAPHIQUE   2=POLYNOMIALE   3=LOGARIT.]
       2-LOI PERMEABILITE(PSI) [1=HOMOG  2=PERM(HUMI) 3=EXPONENTIELLE ]
*** Maillage et Lois caracteristiques du sol        ***
                 << hauteurs des mailles de la couche   1 >>
       5         5         5         5         5         5         5         5
       5         5         5         5         5         5         5         5
       5         5         5         5         5         5         5         5
       5         5         5         5         5         5         5         5
       5         5         5         5         5         5         5         5
       5         5         5         5         5         5         5         5
       5         5         5         5         5         5         5         5
       5         5         5         5
                 << Caracteristiques du sol    couche   1 >>
PSI 1/2K-         0;EXPOS K =         5;PERM SAT=       1-6;
PSI T1/2-        20;EXPOS H =       0.6;TETA SAT=      0.15;TETA RES=       5-2
    $$$ Fin de la definition des couches $$$
*** Limite Superieure du sol                       ***
       0-TYPE         (0-DEBIT ; 1-CHARGE ; 2-TENEUR EN EAU ; 4-PRESSION)
       0-PERIODICITE (0-CONSTANTE ; 1-PAS CONSTANTS    2-DATES FIXES)
       1-INTERPOL.   (0-LINEAIRE    1-INTEG./PALLIERS  2-INTEG/LIN)
     120-CONDITION CONSTANTE
       0-COTE DE LA SURFACE DU SOL
    1096-NOMBRE DE VALEURS DE LIMITES A LIRE EVENTUELL. (0-TOUTES)
       1-DUREE DU PAS DE TEMPS DES DONNEES DE LA LIMITE SUPERIEURE
*** Limite Inferieure du sol                        ***
       3-TYPE         (0-DEBIT ; 1-CHARG ; 2-TENEUR/EAU; 3-GRAD; 4-PRESS)
       0-PERIODICITE (0-CONSTANTE ; 1-PAS CONSTANTS    2-DATES FIXES)
       0-INTERPOL.   (0-LINEAIRE    1-INTEG./PALLIERS  2-INTEG/LIN)
    9999-CONDITION CONSTANTE
       0-NOMBRE DE VALEURS DE LIMITES A LIRE EVENTUELL. (0-TOUTES)
       1-DUREE DU PAS DE TEMPS DES DONNEES DE LA LIMITE INFERIEURE
*** Etat initial au debut des calculs              ***
      20-DATE DU DEBUT SIMULATION
       0-TYPE      (0-TENEUR/EAU  ; 1-CHARGE ; 2-PRESSION)
       0-INTRODUC (0-CONST ; 1-PROFIL H ou HUMI ; 2-couples (Z,H ou HUM)
     8-2-CONDITION CONSTANTE
*** Limites d'une tranche pour un Stock partiel    ***
       0-ALTITUDE DU HAUT DE LA TRANCHE
    -250-ALTITUDE DU BAS  DE LA TRANCHE
*** Editions Regulieres de Bilans et de Profils    ***
       1-NOMBRE DE PAS DE CALCULS ENTRE LES EDITIONS DE BILANS (Listing)
    1000-DUREE MAXIMALE ECOULEE   ENTRE LES EDITIONS DE BILANS (Listing)
     500-NOMBRE DE PAS DE CALCULS ENTRE LES EDITIONS DE PROFILS
     0.5-DUREE MAXIMALE ECOULEE   ENTRE LES EDITIONS DE PROFILS
*** Editions de Profils a dates Fixes              ***
      15        25        35        45        55
*** Numeros des mailles a historique               ***
       1         5        10        15        20        25        30        35
      40        45        50        55
*** Fin bordereau MERINOS 2.0                      ***
```

Figure 11 - Logiciel MERINOS. Fichier paramètres pour simuler un débit imposé en surface pendant 22 jours

```
MERINOS : ESSAI ASSECHEMENT ; NAPPE PEU PROFONDE 3 M (ANALYTIQUE)
*** Nom des eventuels fichiers donnees Entree   2.0 ***
Fichier prevu LIMITE SUP     :ESSAIEVAP.SUP
Fichier prevu LIMITE INF     :ESSAIEVAP.INF
Fichier prevu ETAT INIT.     :ESSAIEVAP.INI
*** Noms des fichiers de Resultats                  ***
Fichier LISTING              :ESSAIEVAP.LST
Fichier HISTORIQUE LIMIT     :ESSAIEVAP.LIM
Fichier HISTORIQUE MAILL     :ESSAIEVAP.MAI
Fichier HISTORIQUE BILAN     :ESSAIEVAP.BIL
Fichier PROFILS CALCULES     :ESSAIEVAP.PRO
Fichier ETAT FINAL           :ESSAIEVAP.FIN
*** Unites des donnees                              ***
       1-UNITE   (M/S) DES PERMEABILITES
     JOU-DUREE         DES TEMPS          (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
     1-2-UNITE   (M)   DES HAUTEURS VERTICALES ET DES CHARGES
     JOU-DUREE DE REFERENCE DES DEBITS/FLUX (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
     1-3-HAUTEUR (M)   DE L'UNITE DE REFERENCE DEBITS/FLUX/VITESSE
     1-3-UNITE   (M)   DES STOCKS (=M3/M2)
*** Resolution et Choix des type de Lois de sol     ***
       0-ALLEG. LIST. (0-COMPL 1-ALLEG. 2-TRES ALL. 3-SUPPR.  -1-DEBUG)
       0-DATE DE FIN DE SIMULATION   (0 SI PERMANENT)
       3-PAS DE TEMPS DE CALCUL MAXIMUM
   0.333-PAS DE TEMPS DE CALCUL MINIMUM
       2-VARIATION MAXIMALE DE VOLUME PENDANT LE PAS DE CALCUL
     2-3-ERREUR DE BILAN MAXIMALE ACCEPTEE (UNITE STOCK)
     1-8-VARIATION MAXIMALE DE CHARGE ENTRE 2 ITERATIONS
   15000-SUCCION MAXIMALE
    1-15-PERMEABILITE MINIMALE IMPOSEE POUR LE SOL
      80-NOMBRE ITERATIONS A CHAQUE PAS   (VALEUR CONSEILLE=20)
     0.3-COEFICIENT DE RELAXATION (CONSEILLE=0.5 ; [1.0-"PAS" RELAX])
       1-LOI RETENTION   [1-HOMOGRAPHIQUE   2-POLYNOMIALE   3-LOGARIT.]
       3-LOI PERMEABILITE(PSI) [1-HOMOG  2-PERM(HUMI) 3-EXPONENTIELLE ]
*** Maillage et Lois caracteristiques du sol        ***
                 << hauteurs des mailles de la couche   1 >>
       5         5         5         5         5         5         5         5
       5         5         5         5         5         5         5         5
       5         5         5         5         5         5         5         5
       5         5         5         5         5         5         5         5
       5         5         5         5         5         5         5         5
       5         5         5         5         5         5         5         5
       5         5         5         5         5         5         5         5
       5         5         5         5
                 << Caracteristiques du sol    couche   1 >>
PSI 1/2K=       100;EXPOS K =         5;PERM SAT=       1-7;
PSI T1/2=       150;EXPOS H =       0.6;TETA SAT=      0.15;TETA RES=       5-2
    $$$ Fin de la definition des couches $$$
*** Limite Superieure du sol                       ***
       0-TYPE        (0-DEBIT ; 1-CHARGE ; 2-TENEUR EN EAU ; 4-PRESSION)
       0-PERIODICITE (0-CONSTANTE ; 1-PAS CONSTANTS    2-DATES FIXES)
       0-INTERPOL.   (0-LINEAIRE    1-INTEG./PALLIERS  2-INTEG/LIN)
  -0.4519-CONDITION CONSTANTE
    -2.5-COTE DE LA SURFACE DU SOL
       0-NOMBRE DE VALEURS DE LIMITES A LIRE EVENTUELL. (0-TOUTES)
       1-DUREE DU PAS DE TEMPS DES DONNEES DE LA LIMITE SUPERIEURE
*** Limite Inferieure du sol                        ***
       4-TYPE        (0-DEBIT ; 1-CHARG ; 2-TENEUR/EAU; 3-GRAD; 4-PRESS)
       0-PERIODICITE (0-CONSTANTE ; 1-PAS CONSTANTS    2-DATES FIXES)
       0-INTERPOL.   (0-LINEAIRE    1-INTEG./PALLIERS  2-INTEG/LIN)
       0-CONDITION CONSTANTE
       0-NOMBRE DE VALEURS DE LIMITES A LIRE EVENTUELL. (0-TOUTES)
       1-DUREE DU PAS DE TEMPS DES DONNEES DE LA LIMITE INFERIEURE
*** Etat initial au debut des calculs              ***
       0-DATE DU DEBUT SIMULATION
       1-TYPE     (0-TENEUR/EAU  ; 1-CHARGE ; 2-PRESSION)
       1-INTRODUC (0-CONST ; 1-PROFIL H ou HUMI ; 2-couples (Z,H ou HUM)
  0.1499-CONDITION CONSTANTE
*** Limites d'une tranche pour un Stock partiel     ***
       0-ALTITUDE,DU HAUT DE LA TRANCHE
    -250-ALTITUDE DU BAS  DE LA TRANCHE
*** Editions Regulieres de Bilans et de Profils     ***
       1-NOMBRE DE PAS DE CALCULS ENTRE LES EDITIONS DE BILANS (Listing)
    1000-DUREE MAXIMALE ECOULEE   ENTRE LES EDITIONS DE BILANS (Listing)
     500-NOMBRE DE PAS DE CALCULS ENTRE LES EDITIONS DE PROFILS
    1000-DUREE MAXIMALE ECOULEE   ENTRE LES EDITIONS DE PROFILS
*** Editions de Profils a dates Fixes              ***
      10        20        30        40        50
*** Numeros des mailles a historique               ***
       1         5        10        15        20        25        30        35
      40        45        50        55
*** Fin bordereau MERINOS 2.0                      ***
```

Figure 12 - Logiciel MERINOS. Fichier paramètres pour simuler une évaporation constante en régime permanent

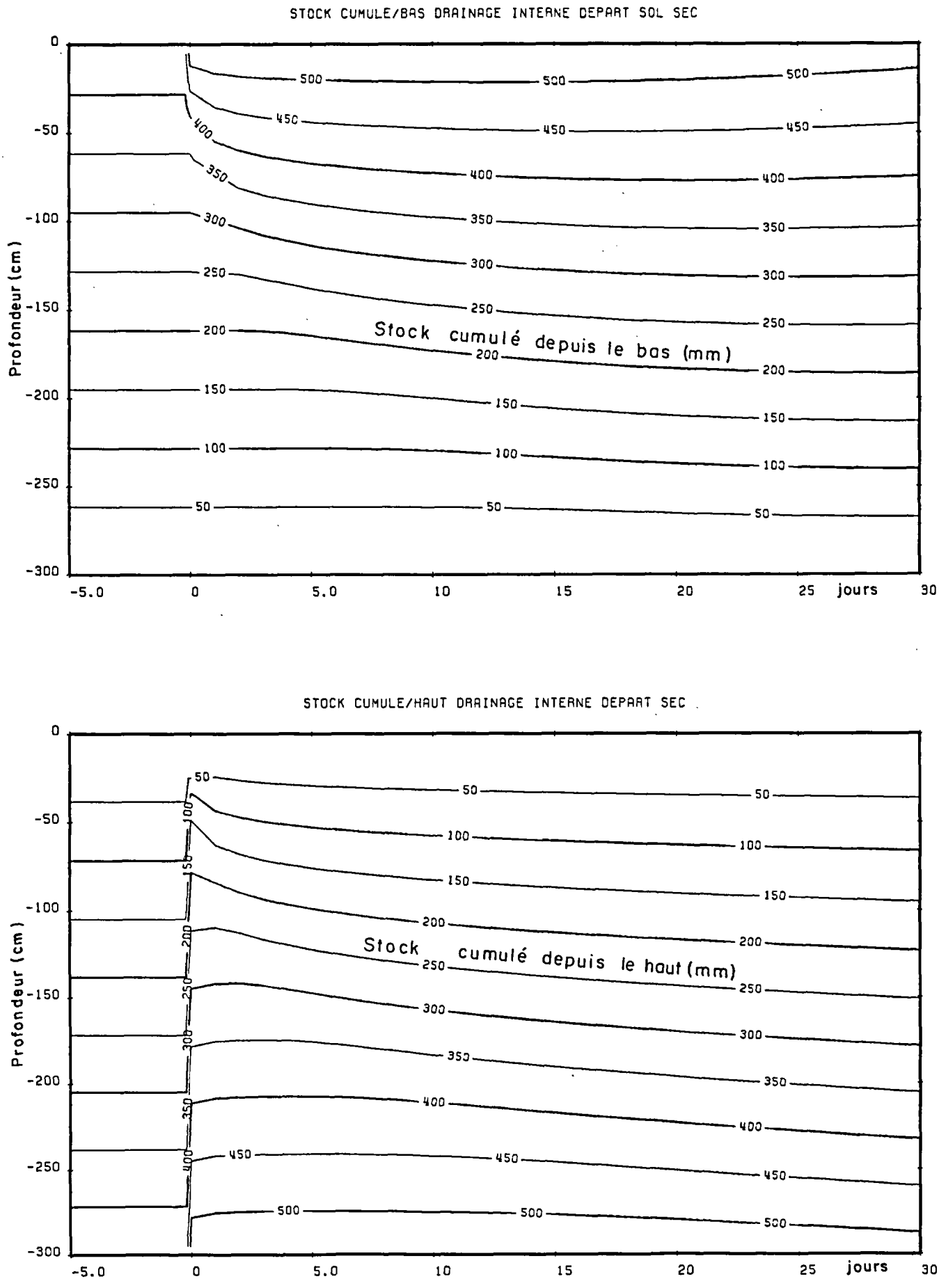


Figure 13 - Drainage interne : évolution des stocks en eau

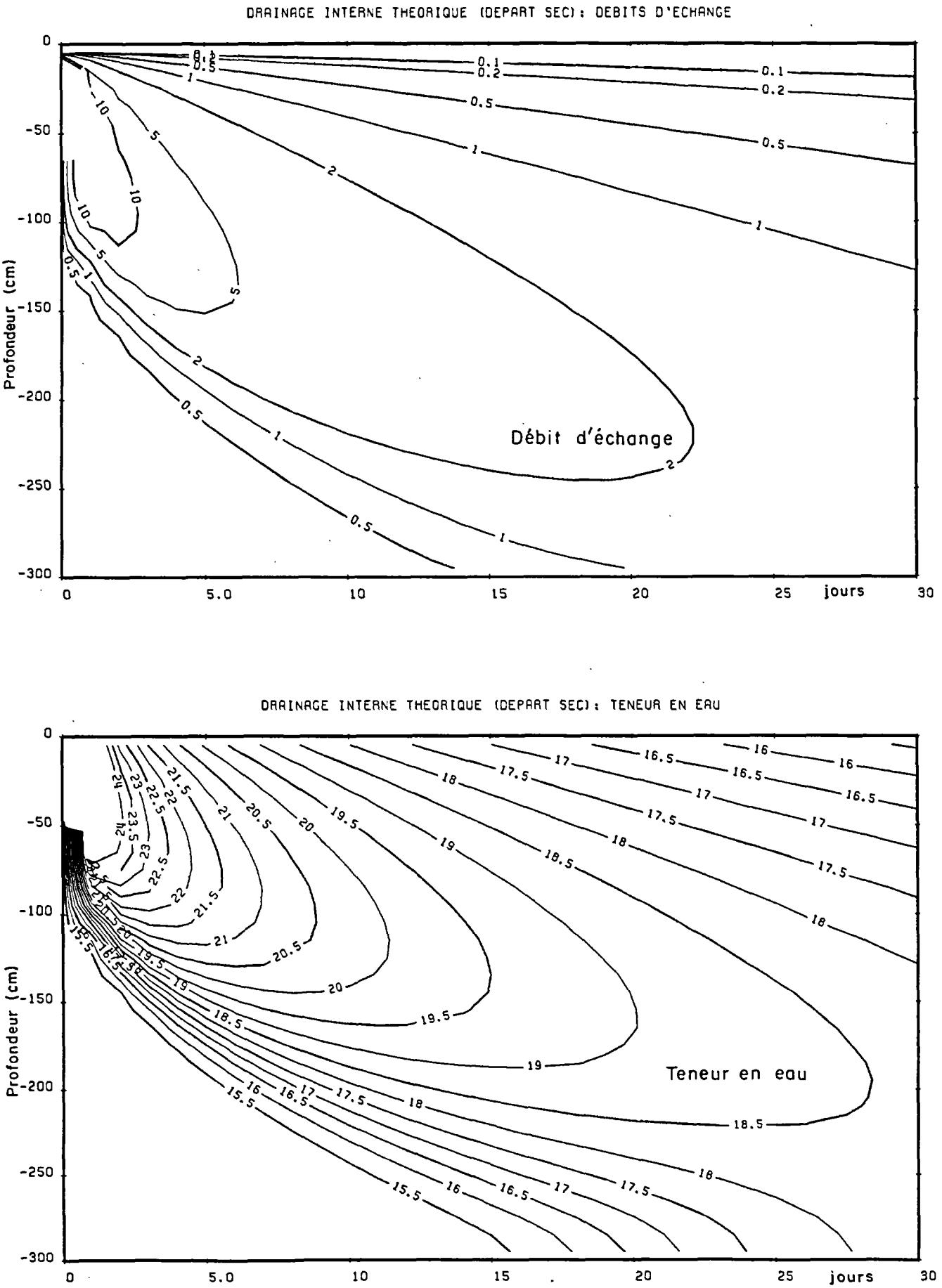


Figure 14 - Drainage interne : évolution des débits d'échange et des teneurs en eau

DEUXIEME PARTIE
PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU MODELE

Rappelons ici les conventions choisies pour les données utilisées :

Les perméabilités, les temps, les altitudes ou charges, les débits ou flux peuvent être donnés par l'utilisateur en n'importe quelle unité choisie par lui. L'unité des altitudes et celle des charges (ou des pressions) doit cependant être la même. Les stocks calculés par le modèle (sous forme de lame d'eau) seront exprimés dans une unité choisie par l'utilisateur.

- Altitudes : elles sont positives vers le haut. L'origine (zéro) étant généralement prise à la surface du sol.

- Charges : quand le sol n'est pas saturé, les charges sont toujours négatives (si le sol est à la cote zéro).

- Pressions : elles sont toujours négatives (ou nulles si le sol est saturé).

- Flux ou Débits : ce sont des débits par unité de surface [$L.T^{-1}$].

- Teneurs en eau : ce sont des teneurs en eau volumiques (sans unité). Elles ne sont pas exprimées en pour cent mais en m^3 d'eau par m^3 de volume de terrain, c'est-à-dire en m^3/m^3 donc par un nombre compris entre 0 et 1.

1 - EQUATION DES ECOULEMENTS DANS LA ZONE NON-SATUREE

On s'intéresse à une colonne verticale de sol.

1.1 - NOTATIONS :

z = altitude positive vers le haut (l'origine 0 étant prise à la surface du sol) [L]
H = charge hydraulique [L] (elle est généralement négative).
h = pression [L] elle est négative sauf si le sol est saturé (localement).
S = cœfficient d'emmagasinement (en non saturé) [-]
Q = débit par unité de surface [$L.T^{-1}$]
K = perméabilité (à l'eau) [$L.T^{-1}$]
Ca = capacité capillaire [L^{-1}]
θ = teneur en eau (volumique) [-]
t = temps [T]

on a la relation :

$H = h + z$
(les 3 termes étant généralement négatifs).

N.B. : notation classique non utilisée ici :

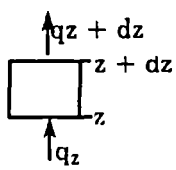
ψ = succion [L] avec $\psi = -h$ (donc positive ou nulle)

1.2 - EQUATIONS

A un moment donné, donc dans un état donné, un élément de sol respecte :

- l'équation de continuité,
- la loi de Darcy.

a) équation de continuité



On écrit que la variation d'emmagasinement est égale à la différence entre le volume entrant et le volume sortant.

$$dV = d\theta.dz = (q_z - q_{z+dz} + Q)dt \qquad (1)$$

dV = variation de volume (par unité de surface) [L]
q = débit (par unité de surface) positif vers le haut [$L.T^{-1}$]
Q = débit extérieur (par unité de surface) positif si injecté [$L.T^{-1}$]

On introduit la notion de cœfficient d'emmagasinement S (variable en fonction de l'état θ du sol).

$$dV = S.dH = d\theta.dz \qquad (2)$$

soit en rapprochant (1) et (2) :

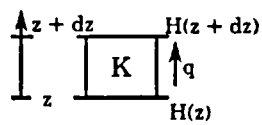
$$S.\frac{dH}{dt} = q_z - q_{z+dz} + Q \qquad (3)$$

S = coefficient d'emmagasinement pour un état donné [-]

$$S = \frac{d\theta}{dH}.dz = \frac{d\theta}{dh}.dz \qquad (4)$$

b) Loi de Darcy

$$q = - K \, Grad \, H = - K.dH/dz$$



1.3 - DISCRETISATION

Soit un ensemble de 3 mailles : la maille de calcul i surmontée de la maille i-1 et surmontant la maille i+1.

dz_{i-1}	i-1	K_{i-1}
dz_i	i	K_i
dz_{i+1}	i+1	K_{i+1}

Pour calculer le débit d'échange entre deux mailles on calcule la perméabilité équivalente entre ces 2 mailles.

Si les deux mailles i et j ont la même épaisseur dz on prend la moyenne géométrique :

$$K_{ij} = \sqrt{K_i K_j}$$

La moyenne géométrique permet en effet des échanges entre deux mailles dont l'une a une perméabilité très inférieure à l'autre.

Si les deux mailles ont des épaisseurs différentes, on calcule les distances entre leurs centres (nœuds) :

$$dz_{ij} = (dz_i + dz_j)$$

et la perméabilité équivalente

$$K_{ij} = K_i^{\,d/zi(dzi + dzj)} . K_j^{\,dzj/(dzi + dzj)} \qquad (6)$$

on note ainsi :

$dz_{i\pm 1/2}$ = distance à la maille i ± 1
$K_{i\pm 1/2}$ = perméabilité équivalente avec la maille i ± 1.

on en déduit le débit d'échange entre les mailles i + 1 et i et entre les mailles i et i-1

$$q_{i+1/2} = K_{i+1/2}\ (H_{i+1} - H_i) /\ dz_{i+1/2} \qquad (7)$$

$$q_{i-1/2} = K_{i-1/2}\ (H_i - H_{i-1}) / dz_{i-1/2} \qquad (8)$$

on pose alors :

$$T_{i\pm 1} = K_{i\pm 1/2} / dz_{i\pm 1/2} = \text{cœfficient d'échange} \qquad (9)$$

on obtient alors :

$$q_{i+1/2} = T_{i+1}\ (H_{i+1} - H_i) \qquad (10)$$

$$q_{i-1/2} = T_{i-1}\ (H_i - H_{i-1}) \qquad (11)$$

D'où en utilisant l'équation de continuité (3) et en notant :

Hi = Hi (t + dt) = charge à la fin du pas de temps
Hp = Hi(t) = charge au début du pas de temps

$$\frac{S}{dt}.(H_i - H_p) = T_{i+1}(H_{i+1} - H_i) + T_{i-1}(H_{i-1} - H_i) + Q \qquad (12)$$

$$- T_{i-1}.H_{i-1} + (T_{i-1} + T_{i+1} + \frac{S}{dt})H_i - T_{i+1}.H_{i+1} = \frac{S}{dt}.H_p + Q \qquad (13)$$

soit :

$$C_1.H_{i-1} + C_2.H_i + C_3.H_{i+1} = C_4 \qquad (14)$$

avec :

$$C_1 = -T_{i-1} \qquad (15)$$

$$C_3 = -T_{i+1} \qquad (16)$$

$$C_2 = T_{i-1} + T_{i+1} + S/dt \qquad (17)$$

$$C_4 = S/dt.H_p + Q \qquad (18)$$

2 - CONDITIONS AUX LIMITES

Trois types de conditions aux limites sont possibles :

- Débit imposé : c'est généralement le cas dans la maille numéro 1 (la maille du haut) soumise à une infiltration ou à une évapotranspiration.

- Potentiel (ou pression) imposé : c'est généralement le cas dans la maille numéro n (la maille du bas) qui correspond à la nappe et à une charge égale à sa profondeur (pression nulle).

- gradient unitaire : cette condition peut être imposée en bas, dans la maille numéro n, pour représenter un débit par percolation gravitaire. Ce type de condition à la limite peut permettre de ne modéliser que la tranche supérieure de la zone non saturée (quelques mètres) la partie inférieure présentant un gradient unitaire.

a) Potentiel H_h imposé dans la maille numéro 1

L'équation (12) écrite dans la maille i = 2 donne :

$$\frac{S}{dt}.(H_2 - H_p) = -T_{i-1}.H_2 + T_{i+1}(H_{i+1} - H_2) + Q + T_{i-1}.H_h$$

$$C_2.H_2 + C_3.H_{i+1} = \underbrace{\frac{S}{dt}.H_p + Q + T_{i-1}.H_h}_{C_4}$$

on fixe donc $C_1(2) = 0$
et on rajoute $T_1.H_h$ dans le cœfficient $C_4(2)$.

b) Potentiel H_b imposé dans la maille numéro n

De la même manière on fixe $C_3(n-1) = 0$
et on rajoute le terme $T_n.H_b$ dans le cœfficient $C_4(n-1)$.

c) Débit Q_h imposé dans la maille numéro 1

Il suffit d'ajouter Q_h dans le cœfficient $C_4(1)$
(et de ne pas oublier que $T_0 = 0$ donc $C_1(1) = 0$).

d) Débit Q_b imposé dans la maille numéro n

Il suffit d'ajouter Qb dans le cœfficient C4(n)
(et de ne pas oublier que Tn + 1 = 0 donc C3(n) = 0).

e) Gradient unitaire dans la maille numéro n

La condition de débit unitaire s'écrit :

$dH/dz = +1$ soit $H_n = z_n + h_0$ et $H_{n+1} = z_{n+1} + h_0$ (fictif) (19)

h_0 étant une pression constante (à un instant donné).
on en déduit que $K_n = K_{n+1} = K_{n+1/2}$ (20)

L'équation (12) pour la maille i = n s'écrit :

$$\frac{S}{dt}.(H_n - H_p) = T_{n-1}(H_{n-1} - H_n) + T_{n+1}(H_{n+1} - H_n)$$

Compte tenu des relations (19) et (20) le dernier terme s'écrit :

$$T_{n+1}(H_{n+1} - H_n) = T_{n+1}(z_{n+1} - z_n) = K_{n+1/2} / (z_n - z_{n+1}).(z_{n+1} - z_n) = -K_n$$

Il suffit donc d'ajouter $-K_n$ dans le cœfficient $C_4(n)$ (et d'imposer $C_3(n) = 0$).

Cette condition est donc très proche de la condition d) mais on ajoute dans $C_4(n)$ le terme $-K_n$ (inconnu) au lieu du terme Q_b (connu).

On remarque bien entendu que si le potentiel est imposé dans la maille numéro 1 ou numéro n on ne calcule pas le potentiel dans ces mailles.

3 - RESOLUTION DU SYSTEME D'EQUATIONS

Le système d'équations (n-2 à n équations suivant les conditions aux limites) conduit à une matrice tridiagonale qui se résout directement par la méthode de THOMAS. On obtient alors directement la solution exacte.

Deux types de problèmes se posent pour la résolution car les cœfficients ne sont pas constants (ni quasi-constants comme dans le cas d'un aquifère dans la zone saturée).

Les perméabilités varient souvent dans le rapport 1 à 1000 suivant l'état du sol et le cœfficient d'emmagasinement varie également très fortement. La perméabilité varie en fonction de la teneur en eau θ ; la pression h varie également en fonction de la teneur en eau. On peut en déduire une loi $K(h) = K(H-z)$.

La perméabilité dépend donc (beaucoup) de la charge H qui varie au cours du pas de temps.

3.1 - MANIÈRE CLASSIQUE POUR RESOUDRE LES PROBLEMES DE VARIATION DES CŒFFICIENTS :

En pratique, les auteurs s'efforcent d'éviter les problèmes dus à la variation des cœfficients en utilisant un pas de temps de calcul dt très petit (associé à une épaisseur de maille très faible). **Vachaud** et **Vauclin** utilisent classiquement un pas de temps d'une seconde (avec des mailles d'un cm d'épaisseur). Durant un tel pas de temps, les cœfficients sont quasiment constants et il importe peu de savoir s'ils sont calculés en fonction de l'état en début ou en fin de pas de temps. Il n'est bien évidemment pas envisageable d'utiliser un tel pas de temps pour des simulations dépassant quelques heures car d'une part le volume de calcul ne serait pas admissible, d'autre part en période de régime à évolution lente on risquerait d'introduire des erreurs d'arrondi qui conduiraient à des résultats erronés. On s'est donc attaché à trouver une solution permettant d'utiliser un pas de temps plus grand en conservant un *bilan* équilibré.

3.2 - SCHEMA DE RESOLUTION DU MODELE MERINOS

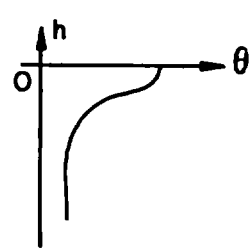
3.2.1 - Cœfficient d'emmagasinement

On a vu qu'on a défini, par commodité, de manière artificielle, un cœfficient d'emmagasinement S équivalent au cœfficient d'emmagasinement utilisé en hydrodynamique des écoulements en milieu saturé.

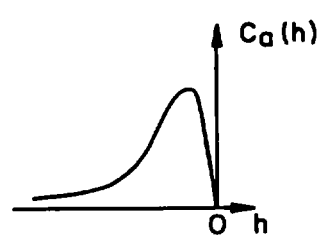
$$S = \frac{d\theta}{dh} . dz$$

on note généralement :

$$Ca(h) = \frac{d\theta}{dh} = \text{capacité capillaire} \quad [L^{-1}].$$



relation h (θ)



capacité capillaire

elle est équivalente au cœfficient d'emmagasinement spécifique utilisé en nappe captive = S/dz.

En effectuant une résolution directe avec un cœfficient d'emmagasinement :

$S = Ca \,.\, dz$

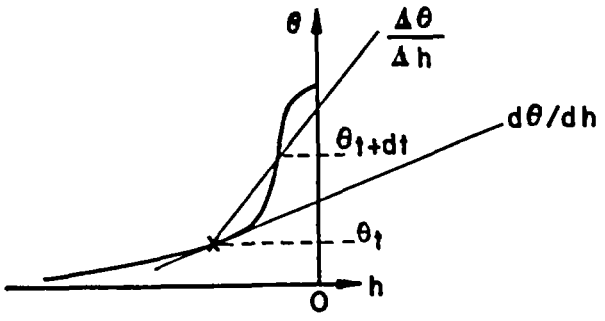
Dans une maille on part au temps t d'une charge H_t correspondant à pression h_t donc à une teneur en eau θ_t et on aboutit au temps t+dt à une charge H_{t+dt} donc à une teneur en eau θ_{t+dt}. On a donc une variation de volume (par unité de surface) :

$$dv = (\theta_{t+dt} - \theta_t) \,.\, dz = \frac{(\theta_{t+dt} - \theta_t)}{dh} \,.\, dH \,.\, dz$$

alors qu'on avait prévu :

$$dv = \left(\frac{d\theta}{dh}\right)_t \,.\, dH.dz$$

Le bilan n'est alors plus équilibré dès que θ varie sensiblement. Le croquis ci-dessous montre la différence entre la tangente dθ/dh et la corde Δθ/Δh ; en particulier quand le sol est saturé on a Δθ/Δh = 0 alors qu'il est bien évident que θ diminuera si h diminue.



Pour résoudre cette difficulté on a choisi de procéder de manière ITERATIVE :

Pour la première itération on pose :

$S_1 = d\theta/dh \,.\, dz = Ca \,.\, dz$ on en déduit les variations $\Delta\theta_1$ et Δh_1.

on pose alors :

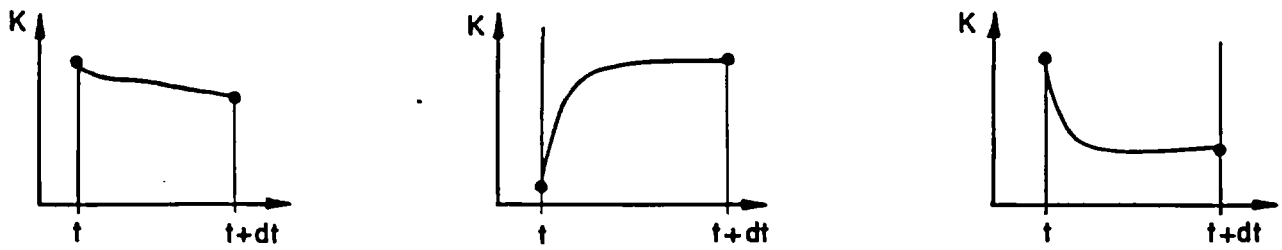
$S2 = \Delta\theta_1/\Delta h_1 \,.\, dz$ on en déduit $\Delta\theta_2$ et Δh_2 d'où $S_3 = \Delta\theta_2/\Delta h_2$ etc.

S converge généralement rapidement.

Quand $S_{i+1} \# S_i$, alors on est assuré que le bilan est équilibré.

3.2.2 - Perméabilité

Le problème qui se pose est que la perméabilité peut varier (considérablement) entre le début du pas de temps et la fin du pas de temps. (Les débits d'échanges varient également du même ordre puisque les perméabilités varient beaucoup plus fortement que les charges). Un des problèmes qui se pose de manière très aiguë est le cas d'une pluie sur un sol très sec. Le sol étant sec la perméabilité supérieure est quasi-nulle et seul un débit très faible peut y rentrer. Le sol resterait donc sec à la fin du pas de temps et aucune augmentation de la teneur en eau ne pourrait survenir. De même quoique moins grave, si une forte évapotranspiration (flux négatif) survient sur un sol humide un débit trop important serait prélevé sans tenir compte que la perméabilité diminuerait très vite. En pratique on peut distinguer 3 cas : voir croquis ci-dessous.



a) évolution naturelle

b) pluie effet d'ouverture de clapet

c) évapotranspiration effet de fermeture de clapet

Variation de la perméabilité au cours du pas de temps.

Il apparaît que dans le cas a) (évolution naturelle) il n'y a pas plus de raison de prendre la perméabilité au début ou à la fin du pas de temps, alors que dans les cas b) et c) (ouverture ou fermeture de "clapet") la perméabilité à la fin du pas de temps est beaucoup plus proche de la perméabilité moyenne au cours du pas de temps.

On a donc choisi de prendre pour les calculs la perméabilité à la fin du pas de temps. Cette perméabilité (qui dépend de la charge à calculer) est inconnue. On procède donc par itérations :

On part de la perméabilité K_0 au début du pas de temps et on calcule les charges. On en déduit alors une première approximation K_1 de la perméabilité à la fin du pas et on refait le calcul pour obtenir K_2 et ainsi de suite.

Cette résolution itérative est plus délicate que celle de la capacité capillaire car des instabilités peuvent se produire par exemple :

Si la maille 1 et la maille 2 (en dessous) ont une faible perméabilité liée à une très faible pression et si une pluie survient :

- 1ère itération : K_1 augmente sous l'effet de l'augmentation de teneur en eau
- 2ème itération : K_1 ayant augmenté le cœfficient d'échange entre la maille 1 et 2 est très augmenté et on obtient dans la maille 1 une charge H1 quasi identique à la charge H2 de la maille 2, donc correspondant à une faible pression. La perméabilité K1 diminue alors fortement.
- 3ème itération : K_1 réaugmente etc.

Pour résoudre cette difficulté on a introduit un cœfficient de sous-relaxation r sur les pressions h calculées à chaque itération.

$$h_i = r.h_{cal} + (1-r).h_{i-1}$$

itération i : valeur calculée ; valeur à l'itération précédente i-1

On évite ainsi des oscillations non convergentes.

N.B. : De bons résultats ont été obtenus avec un cœfficient de sous relaxation de l'ordre de 0.3 à 0.6. Quand on utilise un coefficient de sous relaxation il faut cependant augmenter le nombre d'itérations car la convergence est d'autant plus ralentie que le coefficient est proche de zéro. L'annexe 1 permet de préciser un nombre minimal d'itérations suivant le cœfficient de sous-relaxation.

3.2.3 - Limitation sur les débits injectés (pluie) ou prélevés (évapotranspiration)

Quand les conditions aux limites sont des charges ou des teneurs en eau imposées il n'y a pas de problèmes. Par contre quand on impose un débit (infiltration ou évapotranspiration), le modèle doit vérifier si ce débit est possible :

a) Débit injecté (pluie)

Si le débit injecté est supérieur à la perméabilité à saturation il y aura rapidement une mise en charge à la surface qui n'est généralement pas compatible avec la géométrie de la surface. Il se produira alors un ruissellement du débit excédentaire. On pourrait penser qu'on obtiendrait un équilibre en fixant la perméabilité en surface égale à la valeur de la perméabilité à saturation. En fait on produirait ainsi un "court circuit" avec la maille inférieure qui empêcherait toute convergence. Le modèle calcule donc à chaque itération les perméabilités (en fonction des pressions) et introduit à chaque itération au maximum le débit qui saturerait la maille de surface compte tenu de son état de saturation, de la capacité capillaire de l'itération précédente et du gradient de charge en surface.

b) Débit prélevé (Evapotranspiration)

Le modèle fixe une valeur minimale de pression qui correspond à une succion maximale (par exemple de 10 à 15 m). Il ne prélève que le débit qui, compte tenu de l'état de saturation et des perméabilités, produirait une pression égale à cette pression minimale. Si le prélèvement potentiel est supérieur (évapotranspiration potentielle), le prélèvement réel (évapotranspiration réelle) sera diminué puisque la végétation de surface souffre (ou meurt).

3.2.4 - Débits et volumes

Les débits calculés par le modèle aux limites supérieures et inférieures de la colonne de sol étudiée ne sont pas les débits en fin de pas de temps mais les débits moyens au cours du pas de temps.

Les volumes échangés sont donc obtenus directement en multipliant ces débits moyens Q par la durée dt du pas de temps :

$$Q = \frac{S}{dt}.(H_i - H_p) - T_{i+1}(H_{i+1} - H_i) - T_{i-1}(H_{i-1} - H_i)$$

H_i, H_{i+1}, H_{i-1} = charges finales de la maille de calcul et des mailles inférieures et supérieures.

T_{i+1}, T_{i-1} = drainance finale des mailles inférieures et supérieures.

S = cœfficient d'emmagasinement calculé.

Q = débit moyen au cours du pas de temps (positif entrant).

on obtient alors :

Volume échangé $= Q \cdot dt$
Variation de stock $= S \cdot (H_i - H_p)$

TROISIEME PARTIE
ANALYSE DIMENSIONNELLE

1 - EQUATION ADIMENSIONNELLE

L'équation qui est résolue numériquement dans le modèle MERINOS s'écrit :

$$K.\frac{dH}{dz} + Ca.dz.\frac{dH}{dt} + Q = 0 \qquad (1)$$

Cette équation est discrétisée par pas de temps Δt et par pas d'espace Δz qu'on note pour simplifier l'écriture dt et dz. L'équation discrétisée devient donc en divisant par K :

$$\frac{dH}{dz} + Ca.\frac{dz}{K}.\frac{dH}{dt} + \frac{Q}{K} = 0 \qquad (2)$$

avec $Ca = d\theta/dh$.

Pour rendre cette équation adimensionnelle on suppose qu'elle est résolue pour une discrétisation dt_0 et dz_0, avec une perméabilité à saturation K_s, une teneur en eau à saturation θ_s et une teneur en eau résiduelle θ_r (soit une amplitude $\theta_{sr} = \theta_s - \theta_r$), une succion à demi-saturation h_t.

On pose alors les variables adimensionnelles suivantes :

$$dz' = dz/dz_0 \qquad (3)$$

$$dH' = dH/dz0 \qquad (4)$$

$$dt' = dt/dt0 \qquad (5)$$

$$\theta' = \theta/\theta_{sr} \qquad (6)$$

$$K' = K/Ks \qquad (7)$$

$$Q' = Q/Ks \qquad (8)$$

d'où on déduit :

$$h' = h/dz_0 \qquad (9)$$

$$h'_t = h_t/dz_0 \qquad (10)$$

$$Ca' = Ca.\theta_{sr}/dz_0 \qquad (11)$$

On en déduit alors l'équation adimensionnelle :

$$\frac{dH'}{dz'} + V.Ca'.\frac{dz'}{K'}.\frac{dH'}{dt'} + \frac{Q'}{K'} = 0 \qquad (11)$$

avec :

$$V = \frac{\theta_{sr}.dz_0}{K_s.dt_0} \qquad (12)$$

Le nombre adimensionnel V est en fait le volume maximal stockable dans une maille, divisée par le volume d'eau qui peut arriver en un pas de temps (sous un gradient unitaire) à la perméabilité à saturation.

L'équation à résoudre sera donc numériquement strictement identique si les variables adimensionnelles (3) à (9) sont identiques et si le nombre V est identique.

On peut obtenir des simulations identiques dans les cas suivants :

2 - MAILLAGE IDENTIQUE, PERMEABILITE AUGMENTEE

dz_0 inchangé
K_s est multiplié par a (a = rapport donné)

Il suffit alors que θ_{sr}/dt_0 soit multiplié par le même rapport a :

par exemple :

★ teneurs en eau augmentées dans un rapport a (pour ralentir)

ou bien

★ temps divisé par a.

3 - DEBITS IMPOSES (PAR LES PRECIPITATIONS ATMOSPHERIQUES PAR EXEMPLE)

Q est imposé donc K_s est imposé. Il faut donc conserver le rapport : $\theta_{sr}.dz_0 / dt_0$

par exemple :

★ θ_{sr}/dt_0 constant et maillage inchangé

★ θ_{sr} inchangé et dz_0/dt_0 inchangé.

donc :

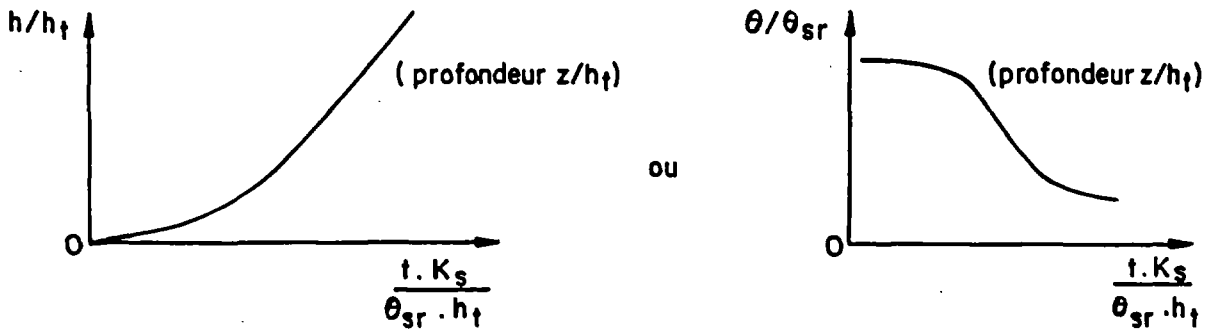
$dz_0 . a$ (d'où H.a, h_t.a, h.a)
et
$dt_0 . a$

Donc pour un même débit imposé, dans un sol ayant la même loi de perméabilité, mais une courbe de rétention h(θ) changée dans un rapport homothétique a, on retrouve partout à la date t.a et à une profondeur z.a :

- les mêmes teneurs en eau θ
- des charges (et des pressions) multipliées par a.

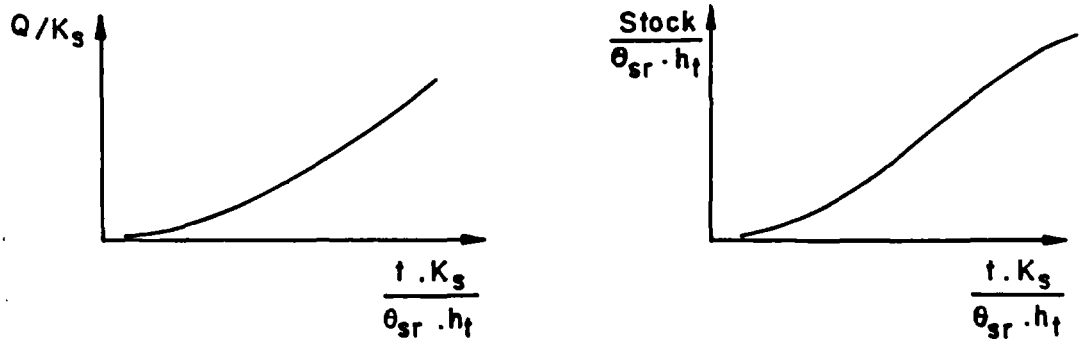
Le temps étant changé (dans un rapport a) ce raisonnement ne tient que si le débit est constant, ou variable en fonction du temps en respectant la condition $dt_0.a$.

Il est ainsi possible d'obtenir, à une profondeur adimensionelle $z' = z/h_t$ donnée, une relation unique avec les variables suivantes :

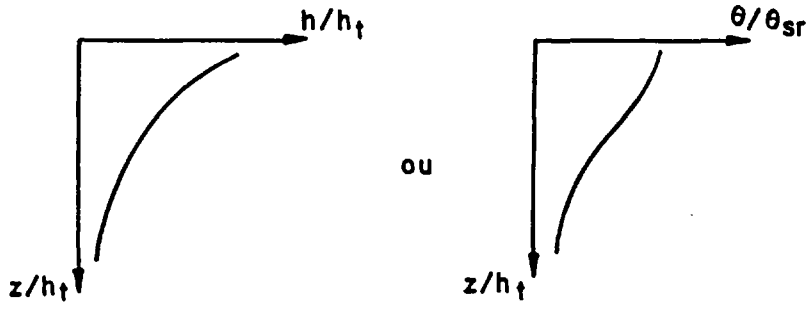


Le débit d'échange Q (à une profondeur donnée est proportionnel à la perméabilité). Le stock cumulé jusqu'à une profondeur adimensionnelle z' est proportionnel à θ_{sr} et à z (donc à h_t).

On obtient donc à la profondeur z/ht l'évolution du débit d'échange Q sous forme d'une courbe unique en fonction du temps adimensionnel, et l'évolution du stock en eau cumulé jusqu'à la profondeur z/ht sous forme d'une courbe unique en fonction de ce même temps adimensionnel.



De même on obtient, à une date donnée $(t.K_s) / (\theta_{sr}.ht)$, un profil unique en variables adimensionnelles :



4 - PAS DE TEMPS CRITIQUE

En reprenant l'équation (2) et en notant H_v les charges voisines dans l'espace et H_p la charge au pas de temps précédent, on obtient :

$$2K \cdot \frac{(H - H_V)}{dz} + Ca \cdot dz \frac{H - H_p}{dt} + Q = 0 \qquad (13)$$

soit encore :

$$H = \frac{H_V + \frac{Ca \,.\, dz^2}{2K \,.\, dt} \,.\, Hp - \frac{Q \,.\, dz}{2K}}{1 + \frac{Ca\, dz^2}{2K.dt}} \qquad (14)$$

On voit ainsi apparaître le nombre adimensionnel :

$$A = \frac{Ca \,.\, dz^2}{2K \,.\, dt} \qquad (15)$$

d'où

$$H = \frac{H_V + A \,.\, Hp - Q\, dz/2K}{1 + A} \qquad (16)$$

Si on calculait explicitement H à partir de H_V et Hp, il faudrait que A ne soit pas trop petit pour bien suivre les variations au cours du temps, et que A ne soit quand même pas trop grand pour éviter des erreurs numériques dues à des arrondis en cas de trop petits pas de temps.

Un pas de temps critique pourrait être alors défini par :

$$t_c = \frac{Ca \,.\, dz^2}{2K} \qquad (17)$$

Bien qu'il puisse être intéressant de calculer ce pas de temps critique, il ne s'agit pas du tout d'une valeur maximale pour le pas de temps de calcul : en effet le modèle MERINOS ne calcule pas une charge H explicitement d'après ses voisines mais résout un système de N équations implicites simultanées, N étant le nombre de mailles de calcul, d'autre part il faut se souvenir que :

- les mailles sont de dimensions variables ;
- les lois de perméabilité et les courbes de rétention sont variables d'une couche à l'autre ;
- les états (K, Ca) sont différents dans chaque maille ;
- En pratique les variations (de teneur en eau ou de charge) sont beaucoup plus amorties en profondeur qu'en surface, bien qu'on ne s'intéresse pas forcément à ce qui se passe en détail en surface ;
- les pas de temps ne sont pas constants puisqu'il existe de longues périodes (hors pluies, après un long réessuyage) pendant lesquelles les mouvements sont très lents et pendant lesquelles le système est en régime quasi-permanent. Les pas de temps peuvent alors être très grands.

On pourra évaluer la valeur de t_c pour avoir un ordre de grandeur du pas de temps minimal (pour éviter les erreurs d'arrondi il faudrait par exemple un pas de temps au moins égal à $t_c/1000$).

Pour calculer simplement t_c on remplacera la capacité capillaire Ca par le rapport d'une variation $d\theta$ de teneur en eau provoquée par une variation dh de pression :

$$t_c = \frac{d\theta \,.\, dz^2}{2\, dh \,.\, K}$$

Exemple d'application :

$d\theta = 10\%$ pour $dh = 2$ m
$dz = 0.1$ m
$K = 10\text{-}8$ m/s

d'où : $t_c = 2.5\ 10^4$ s $\simeq$ 7 heures.

5 - MISE EN FACTEUR D'ECHELLE

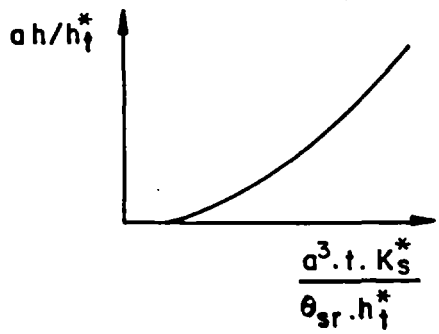
Par analyse dimensionnelle on peut montrer que, entre deux sols "similaires" ayant des grains de diamètres d et d_0 dans le rapport $a = d / d_0$ on a les relations suivantes :

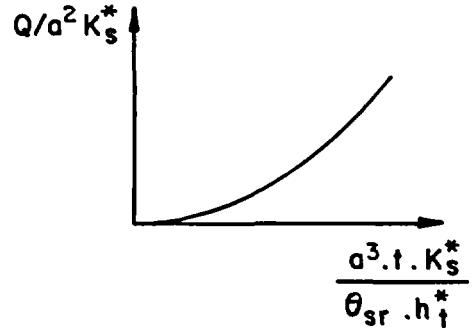
$$K = a^2 K_0 \qquad K_s = a^2 K_{s_0}$$

ou encore

$$h = h_0 / a \qquad ht = ht_0 / a$$

La relation (12) montre immédiatement qu'un sol correspondant au rapport a aura : une charge h/a à la date t/a^3 d'où (en notant h_t^* et K_s^* les paramètres après mise en facteur d'échelle) les relations uniques à la profondeur az / h_t^* :





La figure 15 présente un drainage interne en variables réduites (symboles = cercles). Une autre simulation avec une perméabilité triple, des profondeurs et hauteurs de mailles doubles et des teneurs en eau a saturation multipliées par 1.5 a été superposée (symboles = carrés) ; les 2 simulations sont absolument superposées en variables adimensionnelles.

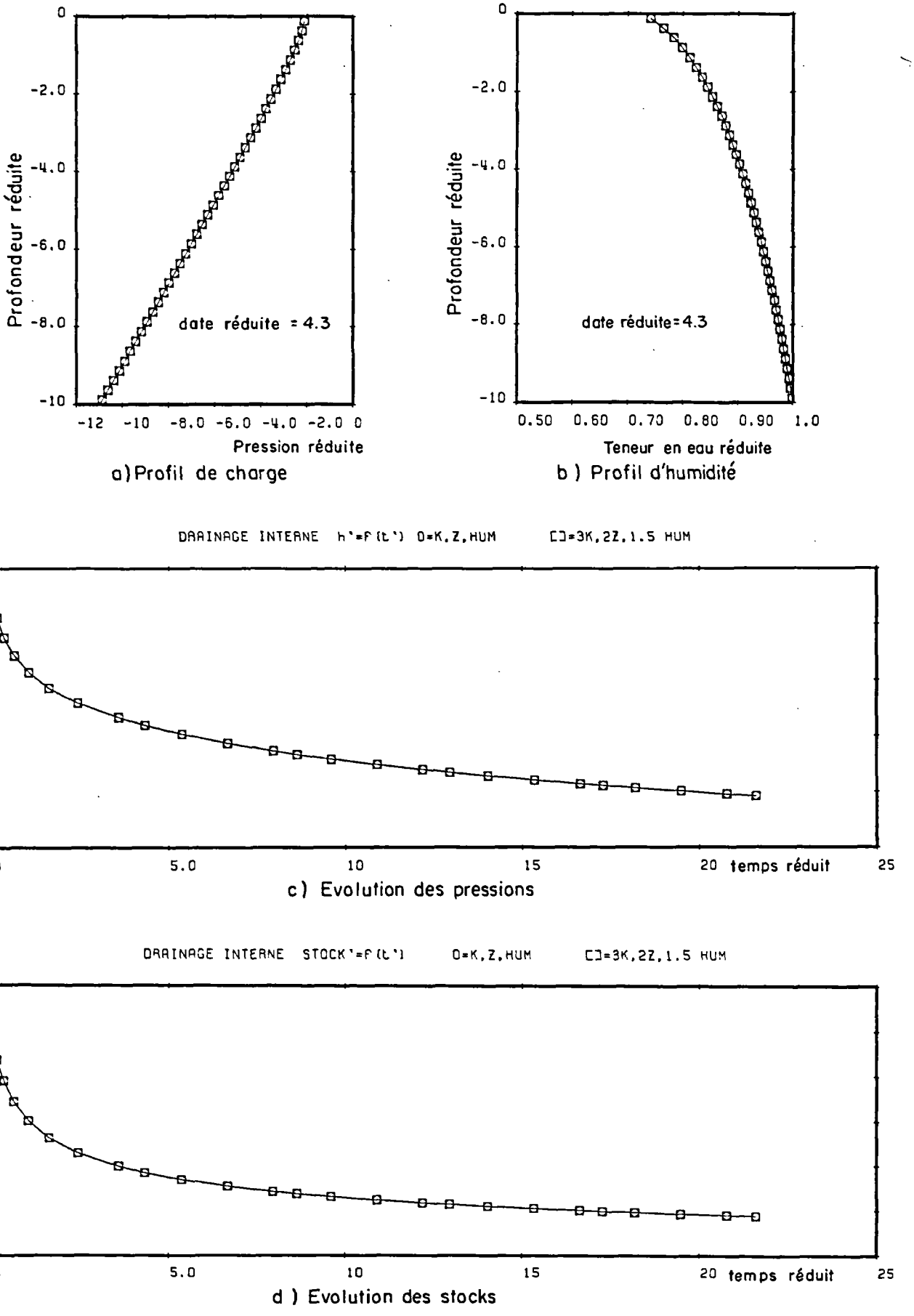


Figure 15 - Analyse dimensionnelle - Simulation d'un drainage interne en variables réduites. Pour chaque point un cercle et un carré obtenus pour 3 K, 2 prof, 1,5 humidité - sont absolument confondus

QUATRIEME PARTIE
DEFINITION ET AJUSTEMENT
DES LOIS CARACTERISTIQUES DU SOL

1 - DEFINITION DES LOIS CARACTERISTIQUES DU SOL

Le sol est caractérisé par deux relations :

- une relation $h(\theta)$ entre la pression et la teneur en eau (c'est la "loi de rétention")
- une relation $K(\theta)$ entre la perméabilité et la teneur en eau.

D'un point de vue pratique, en combinant ces lois on peut obtenir une relation K(h) entre la perméabilité et la pression. Cette relation est cependant "artificielle" car c'est bien la teneur en eau qui agit sur la perméabilité et non la pression.

1.1 - LOIS DE RETENTION

Ces lois tentent de représenter les observations des couples (h, θ) :

a) à saturation : $\theta = \theta_s$ $\quad h = 0$

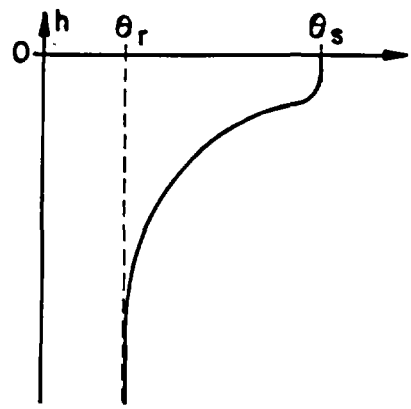
b) à très faible teneur en eau : $\theta = \theta_r$ $\quad h = -\infty$

c) près de la saturation on admet une pente verticale : $dh/d\theta\ (\theta s) = +\infty$

avec :

$\theta_s = \theta$ à saturation
$\theta_r = \theta$ résiduel = θ minimal. Ce n'est généralement qu'un paramètre de calage
h = pression [L] (négative ou nulle).

Le croquis ci-dessous donne la forme type d'une relation $h(\theta)$



Loi de rétention

Deux types de lois sont généralement utilisées :

1) une loi homographique
2) une loi polynomiale.

1.1.1 - Loi homographique

$$h = h_t \left(\frac{\theta_s - \theta}{\theta - \theta_r} \right)^{b_t}$$

h = pression (négative) [L]
θ = teneur en eau volumique [-]
h_t = pression à demi-saturation [L]
b_t = exposant (positif) < 1

si b_t tend vers zéro, la courbe de rétention est une horizontale $h = h_t$ entre θ_r et θ_s. La capacité capillaire est infinie.

On remarque que pour une teneur en eau θ égale à la demi saturation $(\theta_r + \theta_s)/2$ on obtient h_t :

$$\left(\frac{\theta_r + \theta_s}{2}\right) = h_t$$

On vérifie également que cette loi homographique vérifie les trois conditions a), b) et c).

La fonction inverse est :

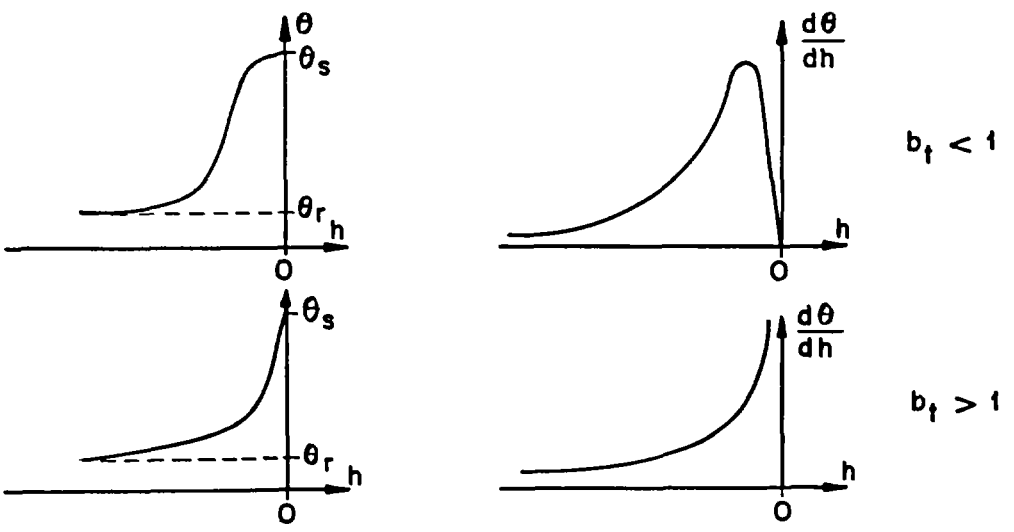
$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \left(\frac{h}{h_t}\right)^{1/b_t}}$$

et sa dérivée s'écrit :

$$\frac{d\theta}{dh} = -\frac{(\theta_s - \theta_r)}{b_t . h} \cdot \frac{(h/h_t)^{1/b_t}}{\left[1 + (h/h_t)^{1/b_t}\right]^2}$$

Cette dérivée est positive (puisque h et h_t sont négatifs) et l'on voit immédiatement que :

- si $b_t < 1$: la dérivée s'annule pour $h = 0$, ce qui correspond bien à la condition c) $dh/d\theta\,(\theta_s) = \infty$
- si $b_t > 1$: la dérivée tend vers l'infini, ce qui n'est pas correct et correspondrait à $dh/d\theta\,(\theta_s) = 0$
- si $b_t = 1$: la dérivée vaut $-(\theta_s - \theta_r)/h_t$



1.1.2 - Loi polynomiale (ou loi puissance)

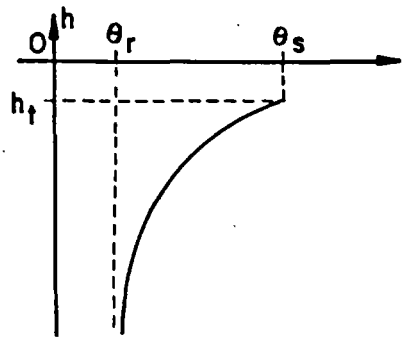
$$h = h_t \left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right)^{b_t}$$

avec les mêmes notations.

On remarque que dans ce cas on obtient la pression h_t pour $\theta = \theta_s$ et on obtient la pression $h_t \cdot 2^{bt}$ à la demi saturation.

La condition b) est vérifiée : $h(\theta_r) = -\infty$ mais les conditions a) et c) ne sont pas vérifiées :

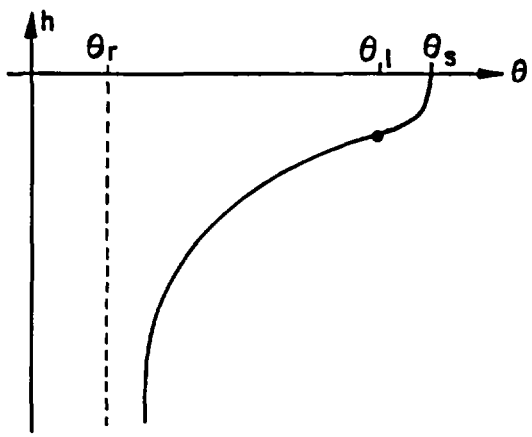
- $h(\theta_s) = h_t$ au lieu de 0
- La courbe a une pente presque horizontale au lieu de verticale.



Loi de rétention polynomiale

Pour respecter les conditions a et c on a tronqué cette loi à 98% de la saturation pour la valeur limite $\theta_l = \theta_r + 0.98\,(\theta_s - \theta_r)$ et on l'a terminée par un arc de parabole :

$$h = h_l \sqrt{\frac{\theta_s - \theta}{\theta_s - \theta_l}} \quad \text{avec } h_l = h_t / 0.98^{b_t}$$



Loi de rétention polynomiale tronquée

La fonction inverse est :

$$\theta = (\theta_s - \theta_r).\left(\frac{h_t}{h}\right)^{1/b_t}$$

$$\theta = \theta_s - (\theta_s - \theta_l).\left(\frac{h}{h_l}\right)^2 \text{ près de la saturation pour } \theta > \theta_l$$

et sa dérivée s'écrit :

$$\frac{d\theta}{dh} = -\frac{(\theta_s - \theta_r)}{b_t . h}.\left(\frac{h_t}{h}\right)^{1/b_t}$$

$$\frac{d\theta}{dh} = -2.h.\frac{(\theta_s - \theta_l)}{h_l^2} \quad \text{pour } \theta > \theta_l \ (h > h_l)$$

1.1.3 - Loi logarithmique

$$h = h_t \, Ln \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r}$$

On vérifie bien que :

$h(\theta_s) = 0$
$h(\theta_r) = -\infty$

pour la demi saturation on obtient :

$$h\left(\frac{\theta_s + \theta_r}{2}\right) = h_t . Ln\, 2$$

La dérivée a pour expression :

$$\frac{dh}{d\theta} = -h_t/(\theta - \theta_r) \qquad \text{ce qui correspond à une pente p:}$$

$p = -h_t/(\theta_s - \theta_r)$ qui n'est pas verticale à la saturation.

1.2 - LOIS PERMEABILITE / TENEUR EN EAU ET LOIS PERMEABILITE / PRESSION

Ces lois tentent de représenter la décroissance très rapide de la perméabilité avec la teneur en eau et (un peu moins rapide) de la perméabilité avec la pression.

Les seules conditions à respecter sont :

a) à saturation

où $\theta = \theta_s$; $h = 0$; $K = K_s$

b) à faible teneur en eau

$$\theta = \theta_r$$
où $$K = 0$$
$$h = -\infty$$

avec K_s = perméabilité à saturation [$L.T^{-1}$].

Les lois généralement utilisées sont :

1.2.1 - Loi perméabilité / teneur en eau

loi polynomiale

$$K = K_s\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{b_K}$$

1.2.2 - Loi perméabilité / pression

loi homographique

$$K = \frac{K_s}{1 + \left(\frac{h}{h_K}\right)^{b_K}}$$

loi exponentielle

$$K = K_s\, e^{-(h-h_0)/h_K}$$

Notations :

b_K = exposant (positif)
h_K = succion de référence dont la signification est, selon le cas :

- loi homographique :

$K(h_K) = K_s/2$ $\quad h_K$ est donc la pression de demi perméabilité maximale.

- loi exponentielle

$K[(h_K . Ln(2)] = K_s/2$

$0.69 . h_K$ est donc la pression de demi perméabilité.
La valeur $1/h_K$ est parfois appelée "atténuation capillaire".

Les 3 lois vérifient les conditions imposées a et b ;

1.2.3 - Loi mixte

Dans le cas de la loi polynomiale en fonction de θ on peut déduire une loi K(h) suivant la loi h(θ) retenue :

- loi h(θ) homographique

en remplaçant θ par sa valeur en fonction de h on obtient :

$$K = \frac{K_s}{\left[1 + \left(\frac{h}{h_t}\right)^{1/b_t}\right]^{b_K}}$$

- loi h(θ) polynomiale

en remplaçant θ par sa valeur on obtient :

$$K = K_s \cdot \left(\frac{h_t}{h}\right)^{\frac{b_K}{b_t}}$$

$$K = K_s \cdot \left[1 - 0.02\left(\frac{h}{h_1}\right)^2\right] \qquad \text{près de la saturation (si } h > h_1)$$

1.2.4 - Loi perméabilité - teneur en eau exponentielle

$$K = K_s\, e^{-a\frac{\theta_s - \theta}{\theta_s - \theta_r}} \qquad \text{DAVIDSON } et\ al. \text{ (1960)}$$

on observe :

$$\theta = \theta_s \rightarrow K = K_s$$

$$\theta = \theta_r \rightarrow K = K_s e^{-a}$$

$$\theta = (\theta_s + \theta_r)/2 \rightarrow K = K_s e^{-a/2}$$

Cette loi est de la forme : $\mathrm{Ln}K = A.\theta + B$

avec $A = \frac{a}{\theta_s - \theta_r}$ $\qquad B = \mathrm{Ln}(K_s) - \frac{a.\theta_s}{\theta_s - \theta_r}$

Elle vérifie la condition (a) mais pas la condition (b)

2 - AJUSTEMENT DES LOIS CARACTERISTIQUES

2.1 - RELATION PERMEABILITE - TENEUR EN EAU (logiciels DEPNOS et AJUSLOI)

Loi polynomiale

On cherche une relation de la forme :

$$K = K_s \cdot \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{b_K}$$

avec :

K = perméabilité [$L.T^{-1}$]
K_s = perméabilité à saturation $L.T^{-1}$]
b_K = exposant (positif) [-]
θ_r = teneur en eau résiduelle
θ_s = teneur en eau à saturation

Il faut se donner θ_s car la relation s'écrit :

$$a.(\theta - \theta_r)^{b_K} \quad \text{avec} \quad a = K_s / (\theta_s - \theta_r)^{b_K}$$

a, b_k et θ_r étant 3 constantes à déterminer.

Etant donné le caractère "multiplicatif" de la perméabilité et ses variations possibles dans un rapport de plus de 1 à 1000 on s'intéresse à reproduire le mieux possible la série des logarithmes des perméabilités déduites des mesures (appelées par abus de langage perméabilités mesurées). L'ajustement se fait donc sous la forme :

$$Ln(K) = Ln(K_s) - b_K Ln(\theta_s - \theta_r) + b_K Ln(\theta - \theta_r)$$

Une régression linéaire entre Ln(K) et $Ln(\theta - \theta_r)$, qui est possible si on se donne θ_r, fournit une valeur approchée des paramètres K_s et b_K optimaux.

En effet si on se donne θ_r on obtient par ajustement, une droite $Ln(K) = B + A\ Ln(\theta - \theta_r)$ avec une pente $A = b_K$ et une ordonnée à l'origine : $B = Ln(K_s) - b_k Ln(\theta_s - \theta_r)$.

On identifie alors $b_K = A$.

Il reste alors la relation entre K_s et θ_s :

$$Ln(K_s) = B + A\ Ln(\theta_s - \theta_r).$$

L'ajustement peut être affiné par une optimisation non linéaire entre Ln(K) et θ (au lieu de Ln(K) et $Ln(\theta - \theta_r)$). Il reste de toute façon l'ambiguité car si on trouve un couple (K_{s_1}, θ_{s_1}) (pour θ_r et b_K fixé) on trouve un ajustement aussi bon pour :

$$\theta_{s_2} \text{ tel que } (\theta_{s_2} - \theta_r)^{b_K} = a(\theta_{s_1} - \theta_r)^{b_K} \text{ soit } \theta_{s_2} = \theta_r + a^{1/b_K} \cdot (\theta_{s_1} - \theta_r)$$

et

$$K_{s_2} = \alpha K_{s_1}$$

L'ambiguité doit pouvoir être levée si on dispose de mesures de θ_s, ou bien d'après la loi de rétention.

2.2 - RELATION PERMEABILITE PRESSION (logiciel AJUSLOI)

2.2.1 - Ajustement direct d'une loi homographique

$$K = \frac{K_s}{1 + \left(\frac{h}{h_k}\right)^{b_K}} \quad \text{avec } h_K = \text{pression de demi perméabilité.}$$

Méthode d'ajustement

On peut essayer différentes valeurs de K_s et poser :

$$\text{Ln}\left(\frac{K_s}{K} - 1\right) = b_K \,\text{Ln}(h) - b_K \text{Ln}(h_K)$$

D'où un ajustement approché par régression linéaire entre Ln [(K_s/K) - 1] et Ln(h).

2.2.2 - Ajustement par optimisation non linéaire

$$\text{Ln}K = \text{Ln}K_s - \text{Ln}\left[1 + (h/h_K)^{b_K}\right]$$

On calcule les dérivées par rapport aux 3 paramètres K_s, h_k et b_k.

a) $$\frac{d\text{Ln}K}{dK_s} = \frac{1}{K_s} \qquad \text{ou plutôt} \quad \frac{d\text{Ln}K}{d\text{Ln}K_s} = 1$$

b) $$\frac{d\text{Ln}K}{dh_K} = \frac{b_K}{h_K} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{h_K}{h}\right)^{b_K}} \cdot \left(\frac{h}{h_K}\right)^{b_K}$$

c) $$\frac{d\text{Ln}K}{db_K} = \left(\frac{h}{h_K}\right)^{b_K} \text{Ln}\left(\frac{h_K}{h}\right) \Big/ \left[1 + \left(\frac{h_K}{h}\right)^{b_K}\right]$$

On remarque que le paramètre K_s est souvent mal déterminé si |hk| est très petit

$K = K_s \cdot \frac{1}{1 + (\frac{h}{h_k})^{b_k}} \rightarrow$ dès que $|hk| >> |h_k|$ ce qui est souvent le cas, on obtient pratiquement :

$$K \simeq K_s |h_K|^{b_K} . |h|^{-b_K} \text{ et seul le produit } K_s |h_K|^{b_K} \text{ est bien identifié}$$

2.3 - RELATION PERMEABILITE - PRESSION EXPONENTIELLE

$$K = K_s e^{-h/h_K}$$

$$LnK = LnK_s - h/h_K$$

d'où un ajustement approché par régression linéaire entre LnK et h.

2.4 - LOI DE RETENTION HOMOGRAPHIQUE

On calcule les dérivées par rapport aux 2 paramètres h_t et b_t

$$\frac{dh}{dh_t} = \left(\frac{\theta_s - \theta}{\theta - \theta_r}\right)^{b_t}$$

$$\frac{dh}{db_t} = h_t Ln\left(\frac{\theta_s - \theta}{\theta - \theta_r}\right).\left(\frac{\theta_s - \theta}{\theta - \theta_r}\right)^{b_t}$$

On suppose que θ_s et θ_r sont :

- soit connus
- soit déterminés par essais successifs. Le calcul de h_t et b_t est réalisé pour chaque couple (θ_s, θ_r). Le couple (θ_s, θ_r) ayant permis le meilleur ajustement est retenu.

2.5 - LOI DE RETENTION POLYNOMIALE

On calcule également les dérivées par rapport aux 2 paramètres h_t et b_t

$$\frac{dh}{dh_t} = \left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r}\right)^{b_t}$$

$$\frac{dh}{dh_t} = h_t . Ln\left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r}\right).\left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r}\right)^{b_t}$$

l'ajustement se fait comme précédemment

3 - QUELQUES VALEURS DE CARACTERISTIQUES DU SOL

3.1 - BAMBEY : VAUCLIN *et al.* (1983)

$$h(\theta) = h_t (\theta_s/\theta)^{b_t}$$

$h_t = -0.166$ m
$\theta_s = 0.301$
$b_t = 1.294$

$$K(\theta) = K_s (\theta/\theta_s)^{b_K}$$

$b_t = 1.294$
$b_K = 6.87$
$K_s = 6.75\ 10^{5}$ m/s

N.B. : Après mise en facteur d'échelle (paramètre a) :

$\sigma_A = 0.527$
$\mu_A = -0.123$ avec $A = Ln(a)$

3.2 - LE THOLONET : BOULIER (1985) - Parcelle n° 13

$h_t = -0.181$ m

$$h(\theta) = h_t (\theta_s/\theta)^{b_t}$$

$h_s = 1.546$ m
($h_0 = -0.065$ m)
$\theta_s = 0.271$ (indice des vides = 0.301)

$$K(h) = K_s e^{-(h-h_0)/h_K}$$

$K_s = 2.59\ 10^{-8}$ m/s
$b_t = 12.3$

Mise en facteur d'échelle

$$h^* = h_t^* (\theta_s/\theta)^{b_t}$$

$h_t = -0.416$ m
$b_t = 11.24$
$\theta_s = 0.291$
$\sigma_A = 0.68$
$\mu_A = -0.176$
$A = L_n(a)$

3.3 - SABLE GRENOBLE : TOUMA (1984)

$$h(\theta) = h_t \cdot \left[\left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right)^{\frac{1}{1-b_t}} - 1 \right]^{b_t}$$

$h_t = -0.515$ m
$b_t = 0.45$
$\theta_s = 0.312$
$\theta_r = 0.0265$
$K_s = 4.28\ 10^{-5}$ m/s
$b_K = 6.07$

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{b_K}$$

3.4 - PANOCHE : WARRICK et AMOUZEGAR - FARD (1979)

$K_s = 9.43\ 10^{-6}$ m/s
$\theta_s = 0.45$

3.5 - LILLE SAINGHIN : AUSSEUR *et al.* (1979) - Couches 1 et 3

$$h(\theta) = h_t\left(\frac{\theta_s - \theta}{\theta - \theta_r}\right)^{b_t}$$

$h_t = 2.17$ m
$\theta_s = 0.37$
$\theta_r = 0.31$

$$K(h) = K_s \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_K}\right)^{b_K}}$$

$b_t = 1.46$
$K_s = 3.5\ 10^{-8}$ m/s
$b_K = 1.03$
$h_k = -0.13$ m

3.6 - SABLE DANS UNE COLONNE - VACHAUD *et al.* (1981)

(Tests de la solution de Philip) HAVERCAMP *et al.* 1977

$$h(\theta) = h_t\left(\frac{\theta_s - \theta}{\theta - \theta_r}\right)^{b_t}$$

$h_t = -0.369$ m
$\theta_s = 0.29$
$\theta_r = 0.075$

$$K(h) = K_s . \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_K}\right)^{b_K}}$$

$b_t = 0.253$
$K_s = 9.42$ 10-5 m/s
$b_K = 4.744$
$h_K = -0.190$ m

3.7 - YOLO LIGHT CLAY (PHILIP 1957)

Courbe de rétention :

$$Ln\left(\frac{h}{0.01}\right) = 5.25\left(\frac{0.495 - \theta}{\theta - 0.125}\right)^{0.25}$$

après ajustement d'une loi homographique (1989) on obtient (avec un cœfficient de corrélation de 0.999) (figure 16) :

$$h(\theta) = h_t\left(\frac{\theta_s - \theta}{\theta - \theta_r}\right)^{b_t}$$

$h_t = -1.22$ m
$\theta_s = 0.495$
$\theta_r = 0.20$
$b_t = 0.88$

ou

$ht = -1.57$ m
$\theta_s = 0.495$
$\theta_r = 0.17$
$b_t = 0.99$

$$K(h) = K_s . \frac{1}{1 + \left(h/h_K\right)^{b_K}}$$

$K_s = 1.23\ 10^{-7}$ m/s
$b_K = 1.77$
$h_K = 0.153$ m

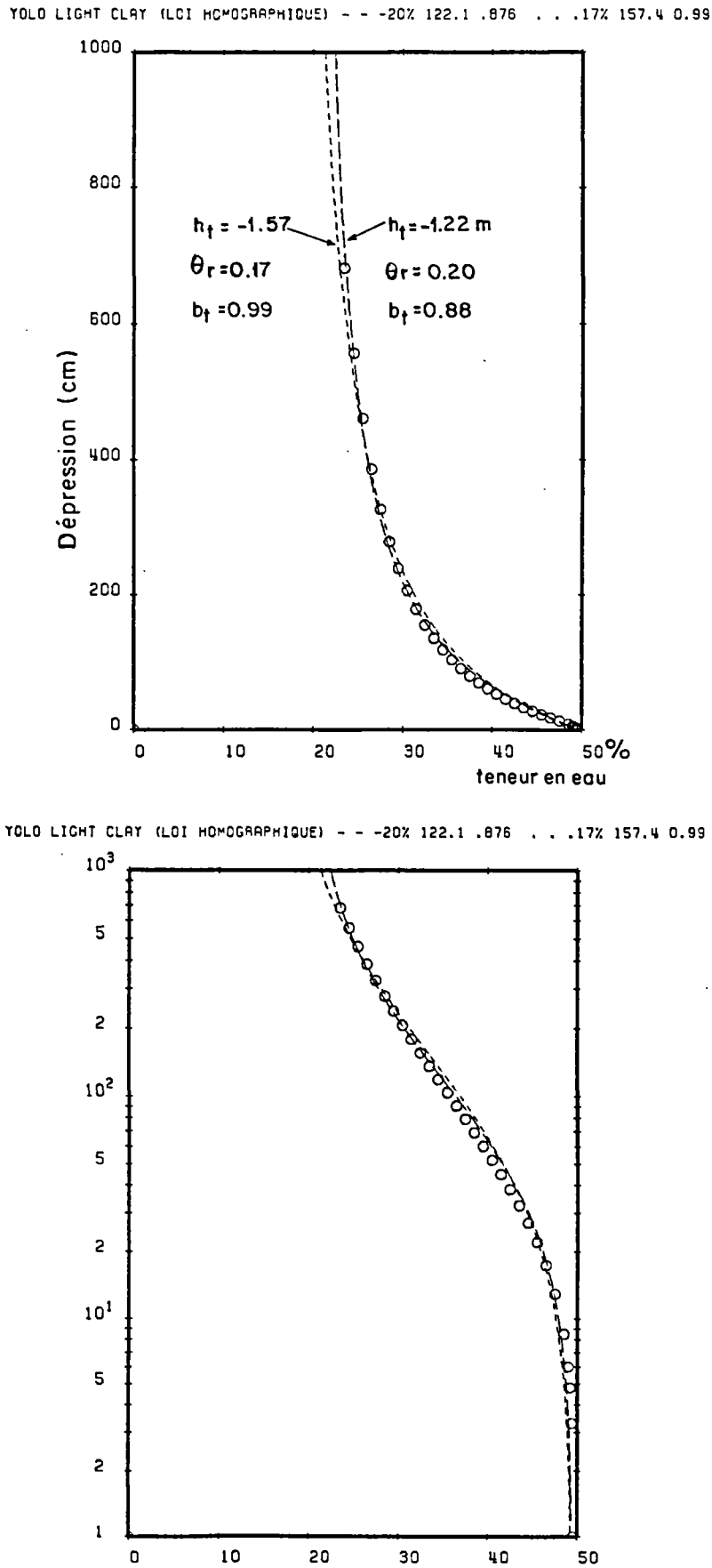


Figure 16 - Ajustement d'une courbe de rétention homographique au sol de Yolo light clay cité par Philip

CINQUIEME PARTIE
SOLUTIONS ANALYTIQUES ET QUASI-ANALYTIQUES

1 - REGIME PERMANENT

La loi de Darcy s'écrit :

$q = - K\, dH / dz$ q étant orienté vers la direction de z croissant c'est-à-dire vers le haut.

En remplaçant H par h+z et en choisissant Q = - q = débit vers le bas c'est-à-dire positif pour une infiltration et négatif pour une évapotranspiration on obtient :

$$Q = K(h).\left(1 + \frac{dh}{dz}\right)$$

1.1 - LOI (PERMEABILITE-PRESSION) EXPONENTIELLE

$$K(h) = K_s\, e^{-h/h_K} \qquad h, h_k, z \text{ sont négatifs}$$

$$Q/K_s = e^{-(H-z)/h_K}.\, dH/dz = e^{-H/h_k}.e^{z/h_k}.\, dH/dz$$

d'où la solution :

$$Q/K_s\, e^{-z/h_K} = e^{-H/h_K} + c \qquad c \text{ étant une constante}$$

soit en imposant la saturation à la cote z bas :

$$(z = z_{bas},\ h = 0, H = z_{bas}) \rightarrow c = (1 - Q/K_s).\, e^{-z_{bas}/h_K}$$

$$H = - h_K\, Ln\left[\frac{Q}{K_s}\, e^{-z/h_K} + \left(1 - \frac{Q}{K_s}\right) e^{-z_{bas}/h_k}\right]$$

Cas particuliers :

- $Q = 0 \quad \rightarrow \quad H = z_{bas}$
- $Q = Ks \quad \rightarrow \quad H = z$ succion nulle, gradient unité.

<u>Débit injecté (pluie ou irrigation)</u>

$Q = a\,.\,k_s \qquad a > 0$

$$H(z) = -h_k\, Ln[a\, e^{-z/h_K} + (1 - a)\, e^{-z_{bas}/h_K}]$$

$$H(z = 0) = - h_k\, Ln[a + (1 - a)\, e^{-z_{bas}/h_K}]$$

si $|z_{bas}| >> |h_K|$ on peut écrire (si $z >> z_{bas}$) :

$$H(z) \simeq z - Ln\left(\frac{1}{a^{|h_k|}}\right)$$

On obtient pratiquement des droites de pente 1 décalées de Ln $(1 / a^{|h_K|})$. c'est à dire avec la pression constante :

$$h = - Ln\left(\frac{1}{a\,|h_k|}\right)$$

C'est la pression qui donne une perméabilité K = Q donc un gradient unitaire.

Débit prélevé (évapotranspiration)

$Q = -a . K_s \quad a > 0$

$$H = -h_K Ln[-a e^{-z/h_K} + (1 + a) e^{-z_{bas}/h_K}]$$

à la surface pour z = 0 on obtient la pression minimale (succion maximale) et la charge :

$$H = -h_K Ln[-a + (1 + a) e^{-z_{bas}/h_K}]$$

Il faut que l'argument du logarithme soit positif

soit une valeur de a

$$a < \frac{e^{-z_{bas}/h_K}}{1 - e^{-z_{bas}/h_K}}$$

d'où le débit maximal qu'il est possible de prélever :

$$|Q_{max}| = K_s \frac{e^{-z_{bas}/h_K}}{1 - e^{-z_{bas}/h_K}}$$

c'est-à-dire, si $|z_{bas}| >> h_K$, on obtient $Q_{max} = K(h=z_{bas})$. C'est le débit correspondant à la perméabilité pour une pression égale à la profondeur.

Si on impose de plus que la dépression en surface ne peut dépasser la valeur h_{max} on obtient :

$$|Q_{max}| = K_s \frac{e^{-z_{bas}/h_k} - e^{-h_{max}/h_k}}{1 - e^{-z_{bas}/h_k}}$$

1.2 - LOI (PERMEABILITE-PRESSION) POLYNOMIALE

$$K(h) = \frac{K_s}{1 + \left(\frac{h}{h_K}\right)^b} \qquad \text{d'ou}$$

$$\frac{Q}{K_s}\left[1 + \left(\frac{h}{h_K}\right)^b\right] - 1 = \frac{dh}{dz}$$

$$\frac{K_s}{Q} \cdot \frac{dh}{1 - \frac{K_s}{Q} + \left(\frac{h}{h_K}\right)^b} = dz$$

$$\frac{K_s}{Q} \int_0^h \frac{dh}{1 - \frac{K_s}{Q} + \left(\frac{h}{h_K}\right)^b} = z - z_{bas}$$

On obtient une solution intégrale uniquement pour certaines valeurs entières de b : b = 1, b = 2.

$$b = 1 \qquad h = h_K\left(\frac{K_s}{Q} - 1\right)\left(1 - e^{\frac{Q}{K_s}.(z - z_{bas})/h_K}\right)$$

- si Q = 0 on obtient $h = -(z - z_{bas})$ soit $H = z_{bas}$
- si $Q = K_s$ on obtient h = 0 soit H = z

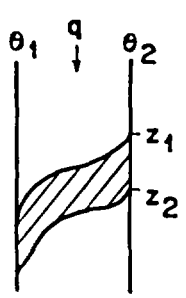
Débit injecté

Si $Q = a.K_s \quad 0 < a < 1$

$$h = h_K \cdot \frac{1-a}{a} \cdot \left[1 - e^{a(z - z_{bas})/h_K}\right]$$

2 - INJECTION CONSTANTE - SOLUTION A L'INFINI

Condition initiale $\theta = \theta_1$ partout



2.1 - INFILTRATION D'UN DEBIT Q CONSTANT (REGIME PERMANENT DE DESCENTE)

Volume injecté de t_1 à t_2 : $V = q . (t_2 - t_1)$
Variation volume : $V = (\theta_2 - \theta_1)(z_2 - z_1)$
(quelle que soit la forme)

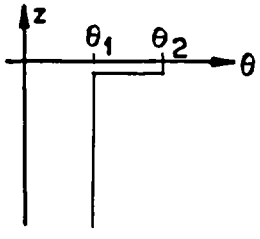
d'où

$$\frac{z_2 - z_1}{t_2 - t_1} = \frac{q}{\theta_2 - \theta_1}$$

si on appelle vitesse de descente : $(z_2 - z_1) / (t_2 - t_1)$, on obtient au front :

$$V_f = \frac{q}{\theta_2 - \theta_1}$$ (attention : ce n'est pas q/θ)

2.2 - IMPOSITION D'UNE TENEUR EN EAU Θ2 EN SURFACE



Il s'établit de même

- une perméabilité : $K_2 = K(\theta_2)$
- une succion $h_2 = h(\theta_2)$.
  Cette succion est constante d'où un gradient unitaire, d'où $q = K_2 = K(\theta_2)$

d'où la vitesse du front vf :

$$vf = \frac{K(\theta_2)}{\theta_2 - \theta_1}$$

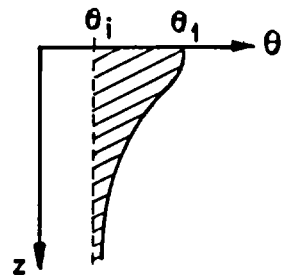
3 - SOLUTION DE PHILIP

3.1 - SOLUTION POUR LES FAIBLES VALEURS DU TEMPS

$$z(\theta, t) = f_1 t^{1/2} + f_2 t^{2/2} + f_3 t^{3/2} + f_4 t^{4/2}$$

3.1.1 - Infiltration cumulée

On l'obtient facilement en intégrant la quantité d'eau sur toute la hauteur. L'infiltration cumulée est égale à la somme du cumul du débit de percolation (constant) à la limite inférieure : $K_i.t$, et du stockage.



$$I = \int_z \theta(z)dz = K_i t + \int_{\theta_i}^{\theta_1} z(\theta, t)\, d\theta$$

$$I = A_1 t^{1/2} + A_2 t^{2/2} + A_3 t^{3/2} + A_4 t^{4/2} + K_i.t$$

$$\text{avec } A_K = \int_{\theta_i}^{\theta_0} f_k\, d\theta$$

3.1.2 - Temps critique

$$t_c = \left[\frac{A_1}{K_1 - K_i}\right]^2 \qquad A_1 = \left[LT^{-1/2}\right] = \text{sorptivité}$$

pour $t > t_c$ le développement à 4 termes ne s'applique plus (PHILIP, 1956).

3.2 - Solution pour les grandes valeurs du temps

3.2.1 - Débit d'infiltration

Au delà de t_c le débit d'infiltration i est donné par (VAUCLIN, VACHAUD, 1984 (Annales Mines)) :

$$i = \frac{dI}{dt} = K_1 + a_1 e^{-a_2 t}$$

$$I = K_1 t - \frac{a_1}{a_2} e^{-a_2 t} + a_3$$

$$\frac{di}{dt} = -a_1 a_2 t$$

a_1, a_2 et a_3 sont déterminés pour assurer la continuité de I, i, di/dt au temps critique.

$$a_2 = \frac{-\frac{di}{dt}(t_c)}{i(t_c) - K_1}$$

I, i et di/dt sont calculés à partir de

$$I = A_1 t^{1/2} + \left(A_2 + K_i\right)t + A_3 t^{3/2} + A_4 t^2$$

$$i = 0.50\, A_1 t^{-1/2} + \left(A_2 + K_i\right) + 1.5\, A_3 t^{1/2} + 2.0\, A_4 t$$

$$\frac{di}{dt} = -0.25\, A_1 t^{-3/2} + 0.75\, A_3 t^{-1/2} + 2.0\, A_4$$

3.2.2 - Profil à l'infini

Le "profil" à l'infini z_∞ est donné par PHILIP 1957-2

$$z_\infty = \int_{\theta_i}^{\theta} \frac{D(\theta)}{K_i - K(\theta) + (K_1 - K_i)\frac{\theta - \theta_i}{\theta_1 - \theta_i}} . d\theta$$

avec $D(\theta) = K(\theta)\, dh/d\theta = K(\theta) / C(\theta)$ = diffusivité capillaire $[L^2.T^{-1}]$

$C(\theta)$ = capacité capillaire $[L^{-1}]$

Profil d'humidité

Pour les fortes valeurs du temps on peut écrire :

$z(\theta,t) = z_\infty + g(t)$

g(t) étant une fonction du temps seulement. On observe alors une translation avec une forme de profil inchangée.

L'infiltration cumulée I est donc déterminée par :

$$I = K_i . t + \int_{\theta_i}^{\theta_1} z\, d\theta = K_i . t + \int_{\theta_i}^{\theta_1} z_\infty\, d\theta + (\theta_1 - \theta_i)\, g(t)$$

$$g(t) = \frac{I(t) - K_i . t - \int_{\theta_i}^{\theta_1} z_\infty . d\theta}{\theta_1 - \theta_i}$$ soit en remplaçant I par sa valeur

$$g(t) = \frac{(K_1 - K_i)t - \frac{a_1}{a_2} e^{-a_2 t}}{\theta_1 - \theta_i} + a_4$$

avec $$a_4 = \frac{a_3 - \int_{\theta_i}^{\theta_1} z_\infty d\theta}{\theta_1 - \theta_i}$$

Vitesse de translation

$$u = \frac{dz}{dt} = \frac{dg}{dt} = \frac{K_1 + a_1 e^{-a_2 t} - K_i}{\theta_1 - \theta_i} = \frac{i - K_i}{\theta_1 - \theta_i}$$

Remarque 1

Quand $t \rightarrow \infty$ le terme exponentiel $\rightarrow 0$

$i \rightarrow K_1$

$dg/dt = (K_1 - K_i) / (\theta_1 - \theta_i)$
On observe donc une translation à vitesse constante u_l

$$u_l = \frac{K_1 - K_i}{\theta_1 - \theta_i}$$

Remarque 2

On trouve parfois la formulation :

$$u = \frac{dg}{dt} = \frac{i - K_i}{\theta_1 - \theta_i}$$ (VACHAUD et VAUCLIN, 1984)

d'où $g = u(t - t_c)$

ce qui n'est pas correct car on trouverait :

$$g = \frac{(K_1 - K_i)t + a_1 t e^{-a_2 t}}{\theta_1 - \theta_i} + c$$ Vitesse $> u_l$

au lieu de $$g = \frac{(K_1 - K_i)t - \frac{a_1}{a_2} e^{-a_2 t}}{\theta_1 - \theta_i} + c$$ Vitesse $< u_l$

Au voisinage de $\theta = \theta_1$ et de $\theta = \theta_i$ l'équation ne s'applique pas :

$z_\infty(\theta_1) = -\infty$

$z_\infty(\theta_i) = +\infty$

On peut cependant obtenir une expression précise aux voisinages de θ_1 et θ_i en posant :

$$K = K_1 - (K_2 - K_1).\frac{\theta - \theta_1}{\Delta\theta} \qquad \text{au voisinage de } \theta_1$$

$$K = K_i - (K_{n-1} - K_i).\frac{\theta - \theta_i}{\Delta\theta} \qquad \text{au voisinage de } \theta_i$$

au voisinage de θ_i, en posant $\Delta z = z - z_{n-1}$ on obtient :

$$\Delta z = \int_{\theta_{n-1}}^{\theta} \frac{D_i.d\theta}{(K - K_i) - u.(\theta - \theta_i)} = \int_{\theta_{n-1}}^{\theta} \frac{D_i.d\theta}{\left(\frac{K_{n-1} - K_i}{\Delta\theta} - \frac{K_0 - K_n}{\theta_0 - \theta_n}\right)^{\theta - \theta_i}}$$

en remplaçant u par $\dfrac{K_o - K_i}{\theta_o - \theta_i}$

$$\Delta z = \frac{D_i}{\frac{n(K_{n-1} - K_i)}{\theta_0 - \theta_i} - \frac{K_0 - K_i}{\theta_0 - \theta_i}} \operatorname{Ln} \frac{\theta - \theta_i}{\theta_{n-1} - \theta_i}$$

$$\Delta z = \frac{D_i(\theta_0 - \theta_i)}{K_0 + (n+1)K_i - nK_{n-1}} \operatorname{Ln}\left(\frac{\Delta\theta}{\theta - \theta_i}\right)$$

si $\theta = \theta_i \rightarrow z_i = +\infty$

au voisinage de $\theta = \theta_1$ on trouve de même :

$$\Delta z = \frac{D_i(\theta_0 - \theta_i)}{(n-1)K_0 + K_i - nK_1} \operatorname{Ln}\left(\frac{\theta_0 - \theta}{\Delta\theta}\right)$$

4 - SOLUTION QUASI ANALYTIQUE DE PARLANGE

Réf. : PARLANGE J.Y. (1971) Theory of Water Movement in Soils : 2 One Dimensional Infiltration. Soil Sci. 111:170-174.
PARLANGE J.Y. (1972) Theory of Water Movement in Soils : 8 One Dimensional Infiltration with constant flux at the surface. Soil Sci 114:1-4.
HAVERCAMP, R., VAUCLIN, M., TOUMA, J., WIERANGA, P.J., VACHAUD, G. Comparison of numerical Simulation Models for One Dimensional Infiltration. Soil Science Society American Journal. Vol. 41, 1977.

4.1 - EQUATION DE RICHARDS

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K(\theta)\left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1\right)\right] = \frac{\partial}{\partial z}\left(K(\theta).\frac{\partial H}{\partial z}\right) \qquad (1)$$

z = axe vertical orienté vers le haut
h = pression (négative)
K = perméabilité
θ = teneur en eau
t = temps
H = charge.

On pose classiquement :

$C(\theta) = d\theta/dh$ = capacité capillaire (m^{-1}) (positive) (2)

$D(\theta) = K(\theta)/C(\theta)$ = Diffusivité (3)

On peut alors réécrire l'équation (1) en remplaçant $K(\theta)$ par $D(\theta) . d\theta/dh$.

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K(\theta).\frac{\partial h}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}K(\theta) = \frac{\partial}{\partial z}\left(D(\theta).\frac{\partial h}{\partial z}\right) + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \qquad (4)$$

On introduit la relation :

$$\left(\frac{\partial z}{\partial t}\right)_\theta = \left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right)_z . \left(\frac{\partial z}{\partial\theta}\right)_t \qquad (5)$$

(<0) (>0) (>0)

On transforme alors l'équation (4)

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = -\frac{\partial z}{\partial t}.\frac{\partial\theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left(D.\frac{\partial\theta}{\partial z}\right) + \frac{\partial K}{\partial z} \qquad (6)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial\theta}\left[D.\frac{\partial\theta}{\partial z}\right] = -\frac{dK}{d\theta} \qquad (7)$$

On pose la condition initiale :

$\theta = \theta_0$ au temps initial

et un flux constant en surface à partir de $t > 0$:

$q = q_0 = K + D.\partial\theta/\partial z$ (8)

PARLANGE montre alors qu'il est possible de déterminer la loi $\theta_{sup}(t)$ de la teneur en eau à la surface.

4.2 - TENEUR EN EAU EN SURFACE

Soit une valeur θ_{sup} quelconque comprise entre θ_0 et θ_f (θ_f = teneur en eau finale ; $K(\theta_f) = q_0$).

Il est possible d'obtenir la date t à laquelle on observe θ_{sup} par l'intégrale :

$$t = \int_{\theta_0}^{\theta_{sup}} \frac{D(\lambda).(\lambda - \theta_0)}{\left[q_0 - K(\lambda)\right].(q_0 - K_0)}.d\lambda \qquad (9)$$

avec

λ = variable muette correspondant à θ
θ_0 = teneur en eau initiale
K_0 = perméabilité initiale ; $K_0 = K(\theta_0)$
q_0 = débit imposé en surface.

4.3 - PROFIL D'HUMIDITE

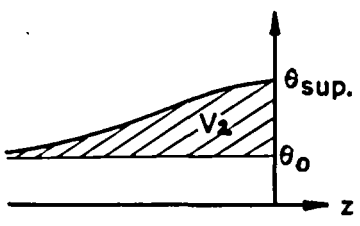
On obtient ainsi une série de couples (t, θ_{sup}), d'où une courbe $\theta_{sup}(t)$. PARLANGE montre qu'il est possible d'en déduire le profil d'humidité à une date donnée t.

$t \rightarrow \theta_{sup}(t)$ et

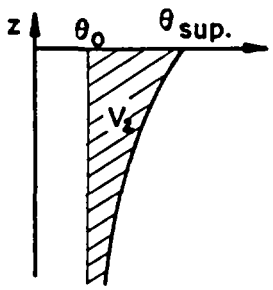
$$z(\theta, t) = \int_{\theta}^{\theta_{sup}} \frac{D(\lambda)}{(q_0 - K_0).\left(\frac{\lambda - \theta_0}{\theta_{sup} - \theta_0}\right) - (K(\lambda) - K_0)}.d\lambda \qquad (10)$$

avec les mêmes notations que pour l'intégrale (9).

La solution n'est qu'approchée. Il faut vérifier l'équation de continuité.
Le volume emmagasiné est : $V_1 = q_0 . t$. Ce volume doit être égal à la variation de teneur en eau V_2



ou



$$V_2 = \int_{-\infty}^{0} \left(\theta(z) - \theta_0\right) dz \qquad V_2 = -\int_{\theta_0}^{\theta_{sup}} z(\theta).d\theta$$

Généralement $V_1 \neq V_2$ mais la forme du profil est correcte. On calcule donc la date t' (différente de t) qui permet d'assurer l'équation de continuité $t' = V_2 / q_0$.

5 - SOLUTION ANALYTIQUE D'OGATA ET BANKS

OGATA et BANKS (1961), cité par JAYAWARDENA et KALUARACHCHI (1986). Journal of Hydrology, 84, May 30 1986, pp. 237-238.

$$u = \frac{\partial K}{\partial \theta} = \text{constante}\,[L.T^{-1}] \qquad (1)$$

$$D(\theta) = K(\theta).\frac{dh}{d\theta} = D = \text{constante}\,[L^2T^{-1}] \qquad (2)$$

$$(1) \rightarrow K = K_s.\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = u.(\theta - \theta_r) \qquad \text{(c'est à dire exposant 1)} \qquad (3)$$

$$(2) \rightarrow \frac{dh}{d\theta} = -\frac{D}{K} = -\frac{D}{u}.\frac{1}{\theta - \theta_r} \qquad (4)$$

$$h = -\frac{D}{u}.\text{Ln}\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = h_t.\text{Ln}\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \qquad (5)$$

On en déduit la loi K(h) d'après la relation (3), en tirant $(\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ de (5)

$$K = K_s.\exp\left(\frac{h}{h_t}\right) \qquad (6)$$

d'où

$K_s = u.(\theta_s - \theta_r)$
$h_t = -D/u$
$h_K = -D/u$

la solution est

$$\theta = \theta_i + \frac{\theta_0 - \theta_i}{2}\left[\text{erfc}\frac{z - ut}{\sqrt{4Dt}} + \exp\left(\frac{uz}{D}\right)\text{erfc}\frac{z + ut}{\sqrt{4Dt}}\right] \qquad (7)$$

Exemple (Journal of Hydrology May 1986)

$\theta_i = 0.10$ $\quad D = 5\,10^{-5}$ m2/s
$\theta_0 = 0.38$ $\quad u = 10^{-3}$ m/s

par exemple :

$\theta_r = 0.0999$ $\quad K_s = 5\,10^{-4}$ m/s
$\theta_s = 0.5999$ $\quad h_t = -5\,10^{-2}$ m

on obtient :

$h_i = -0.426$ m $\quad h_0 = -0.029$ m
$K_i = 10^{-7}$ m/s $\quad K_0 = 2.80\,10^{-4}$ m/s

N.B. : $\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)\exp(h/h_t)$

$$\frac{d\theta}{dh} = \frac{\theta_s - \theta_r}{h_t}.\exp(h/h_t) \qquad (8)$$

SIXIEME PARTIE
VALIDATION DU MODELE

1 - INFILTRATION A CHARGE CONSTANTE : SOLUTION D'OGATA ET BANKS

1.1 - DECOUPAGE DU TEMPS ET DE L'ESPACE

On a modélisé une colonne de 220 millimètres pendant une période de 25 secondes. Le temps a été découpé en 50 pas égaux de 0.5 seconde chacun. L'espace a été découpé en 46 mailles :

* 4 mailles en surface, respectivement de 1, 2, 3 et 4 mm
* suivies de 42 mailles de 5 millimètres chacune.

1.2 - LOIS DE RETENTION ET DE PERMEABILITE

* la loi de rétention a été choisie sous forme logarithmique
* la loi perméabilité-teneur en eau est une loi polynomiale.

Les paramètres sont les suivants :

h_t = - 50 mm
θ_s = 0.5999
θ_r = 0.0999
b_t = 1
k_s = 10-4 m/s
h_k = - 50 mm

d'où une diffusivité D = 5 10^{-5} m^2/s et une vitesse u = 10^{-3} m/s.

Résultats

On a calculé l'évolution des teneurs en eau et des pressions à partir d'une valeur initiale de teneur en eau θ_i = 0.38

La figure 20 montre que les profils calculés aux dates 0.5, 5, 10, 15, 20 secondes (cercles) sont indiscernables de la solution analytique (courbe continue).

2 - EVAPORATION CONSTANTE ET REPRISE A LA NAPPE

2.1 - DECOUPAGE DU TEMPS ET DE L'ESPACE

On a modélisé une épaisseur de 3 mètres de zone non saturée en régime permanent. La nappe est donc fixée à la profondeur de 3 mètres qui a été découpée en 60 mailles de 5 centimètres d'épaisseur.

2.2 - LOIS DE RETENTION ET DE PERMEABILITE

* la loi de perméabilité-pression a été choisie exponentielle.

Les paramètres sont les suivants :

h_t = - 1 m (fictif puisque régime permanent)
θ_s = 0.15
θ_r = 0.05
b_t = 0.6 (fictif puisque régime permanent)
k_s = 10^{-7} m/s
h_k = - 1 m.

On a imposé une évaporation Q constante de 5.23 10^{-9} m/s (soit 0.4519 mm/j)) d'où un ratio Q/K_s égal à 0.0523. A la limite inférieure on a imposé une pression nulle qui correspond à la présence de la nappe (saturation).

2.3 - RESULTATS

La figure 19 montre la comparaison entre le profil de charge en régime permanent calculé (cercles) et la solution analytique (trait continu). La concordance est parfaite avec l'expression suivante décrite dans la cinquième partie de ce rapport :

$$H = L_n (0.05239 - 0.0523 \exp(z)).$$

3 - INFILTRATION A DEBIT CONSTANT SOLUTION QUASI ANALYTIQUE DE PARLANGE

3.1 - DÉCOUPAGE DU TEMPS ET DE L'ESPACE

On a modélisé une tranche de 152 mm découpée en 76 mailles de 2 mm d'épaisseur. Le temps a été découpé en pas égaux de 1/100 heure (36 secondes) chacuns. L'état initial a été choisi avec une teneur en eau constante égale à 0.10 dans toutes les mailles. A l'instant 0 on a imposé en surface un débit égal à 10^{-6} m/s. A la limite inférieure on a imposé un gradient unitaire.

3.2 - LOIS DE RÉTENTION ET DE PERMÉABILITÉ

* la loi de rétention a été choisie sous forme homographique
* la loi de perméabilité-pression est une loi homographique.

Les paramètres sont les suivants :

h_t = -0.369 m
θ_s = 0.29
θ_r = 0.075
b_t = 0.253
k_s = 9.42 10^{-7} m/s
b_k = 4.74
h_k = - 0.190 m.

3.3 - RÉSULTATS

La figure 19 montre les profils de teneur en eau obtenus après 0.5, 1, 2 et 3 heures. Cette figure montre une concordance parfaite avec la solution quasi-analytique décrite dans la cinquième partie.

4 - INFILTRATION A CHARGE (OU TENEUR EN EAU) CONSTANTE SOLUTION QUASI-ANALYTIQUE DE PHILIP

4.1 - DECOUPAGE DU TEMPS ET DE L'ESPACE

On a modélisé une tranche de 152 mm découpée en 76 mailles de 2 mm d'épaisseur. Le temps a été découpé en pas égaux de 1/100 heure (36 secondes) chacun.

4.2 - LOIS DE RETENTION ET DE PERMEABILITE

Elles ont été choisies identiques à celles utilisées pour la vérification de la solution de Parlange.

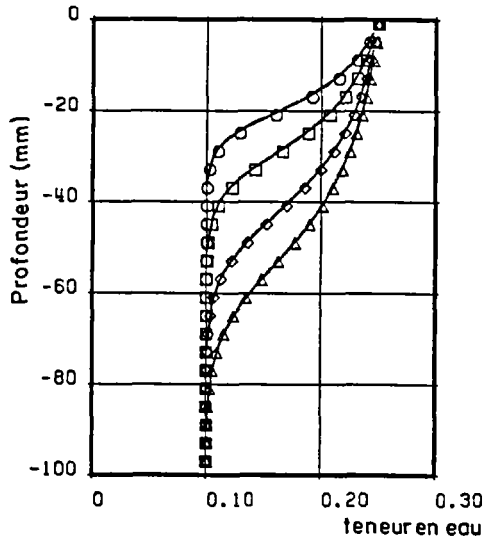
On a fixé une teneur en eau initiale de 0.10 puis à l'instant t = 0, on a imposé une teneur en eau égale à 0.25. A la limite inférieure on a imposé un gradient unitaire.

4.3 - RESULTATS

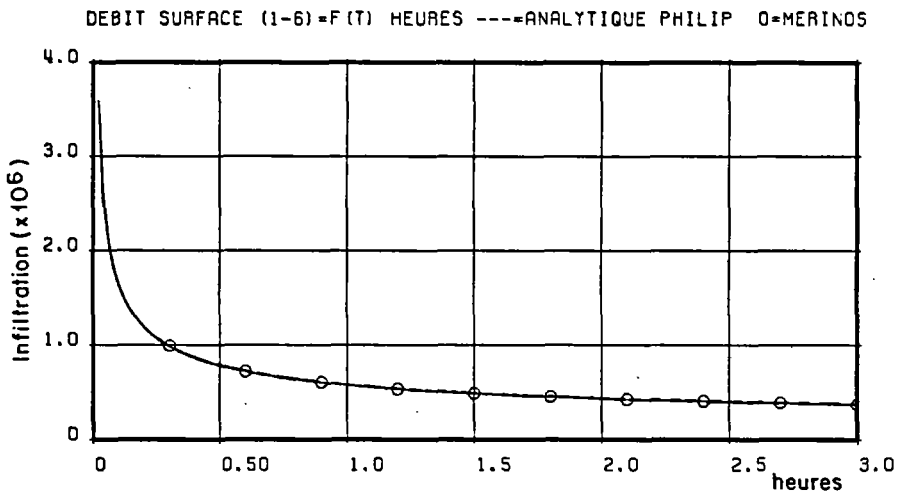
La figure 17 présente les profils d'humidité après 0.5, 1, 2 et 3 heures. On vérifie bien que l'accord est très bon.

Pour montrer la robustesse du modèle vis-à-vis de grands pas de temps et d'espace, on a effectué un 2ème calcul avec des pas de temps d'une demi heure et une épaisseur de 580 mm découpée en seulement 19 mailles de dimensions augmentant de 1 mm en surface à 60 mm en profondeur. La séquence des mailles est : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 12, 24, 36, 50, 60, 60, 60, 60, 60, 60, 60 mm.

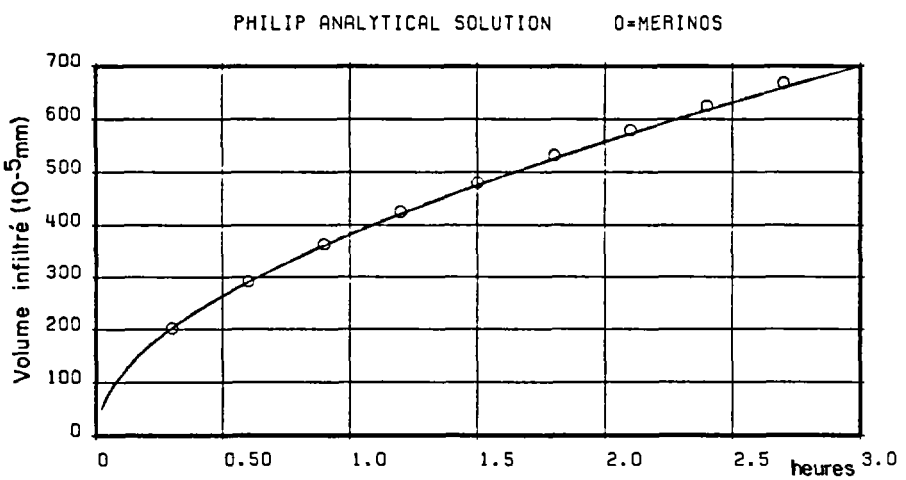
La figure 18 montre qu'on obtient avec ces pas de temps des profils tout à fait admissibles. On remarque en particulier que l'infiltration cumulée est quasiment exacte et que les bilans sont donc parfaitement équilibrés.



a - Profil de teneur en eau après 0,5, 1, 2 et 3 heures

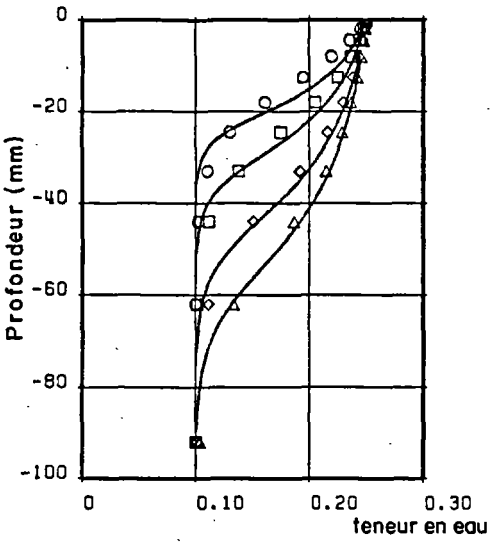


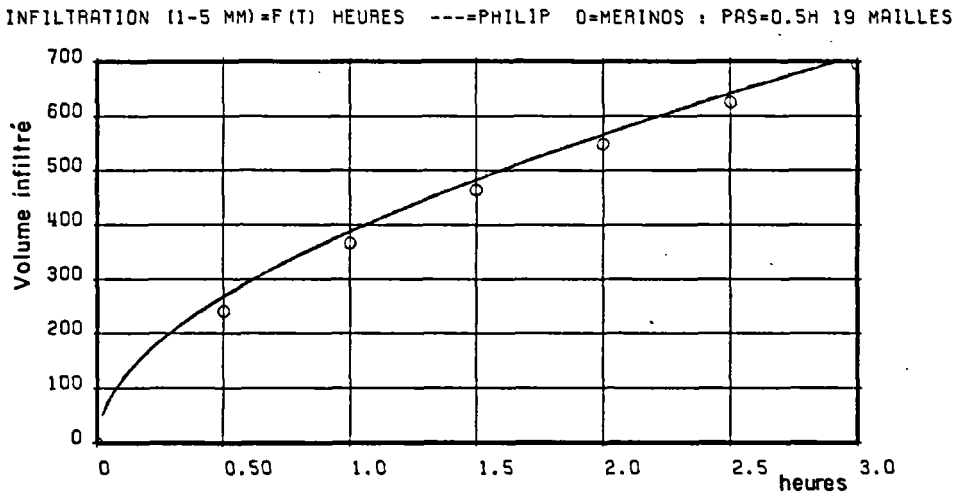
b - Infiltration instantannée



c - Volume infiltré

Figure 17 - Solution quasi-analytique de Philip (trait continu)
O = modèle MERINOS à pas de temps fin





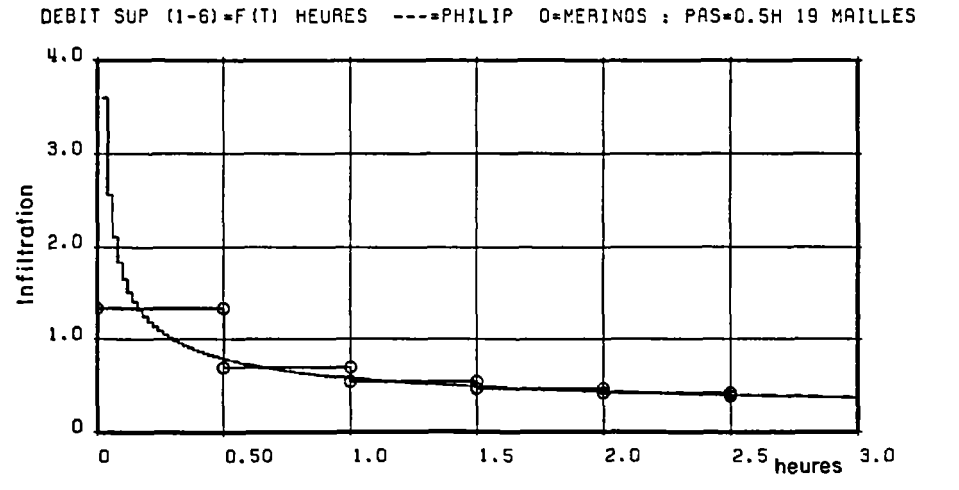
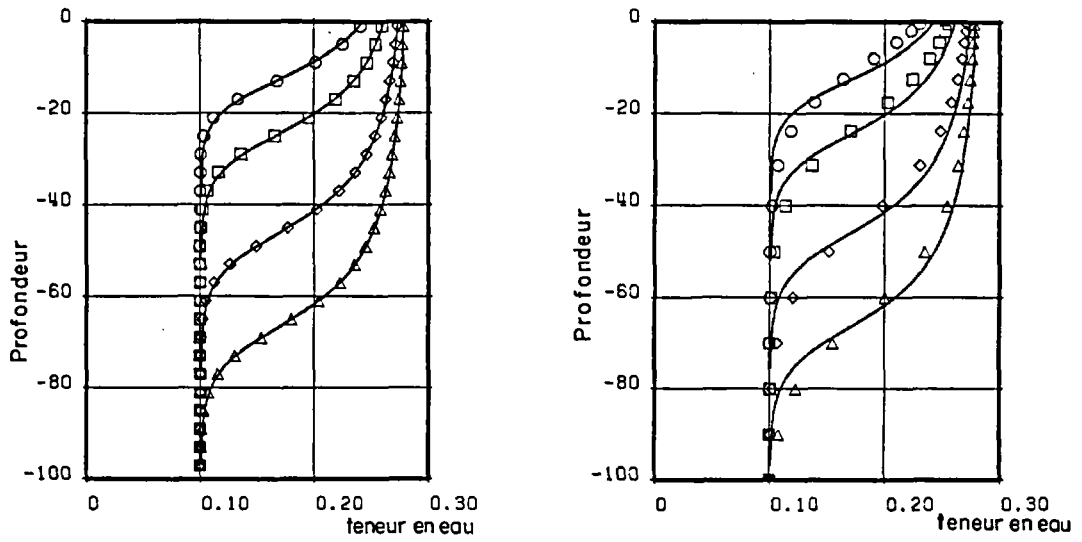
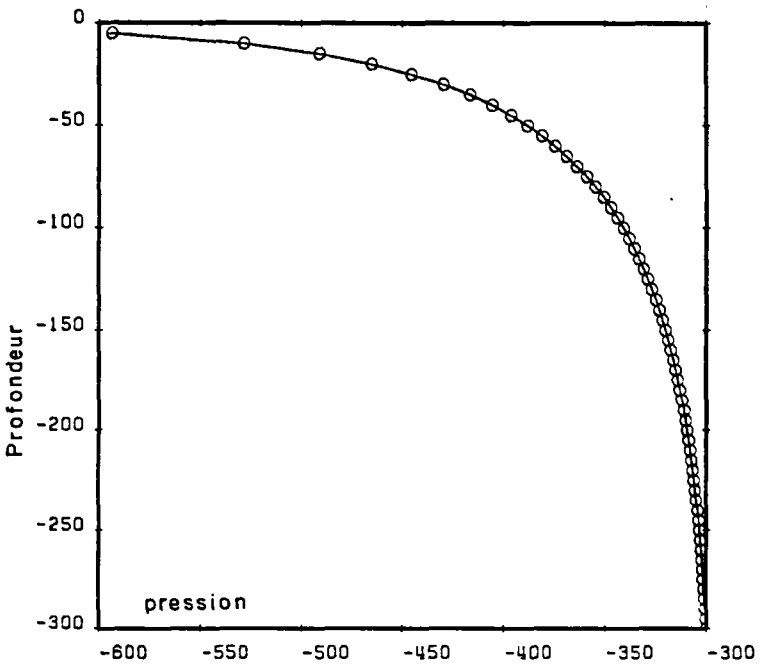


Figure 18 - Solution quasi-analytique de Philip
O = modèle MERINOS avec seulement 19 mailles et un pas de calcul de 0,5 heures



Infiltration constante ; en continu : solution de PARLANGE.
Symboles = modèle MERINOS pour les dates 0.5, 1, 2 et 3 heures
(à gauche maillage fin ; à droite 19 mailles et pas de calcul de 0.5 heures)



c - Evaporation constante et reprise à la nappe

Figure 19 - Solution de Parlange et évaporation avec reprise à la nappe

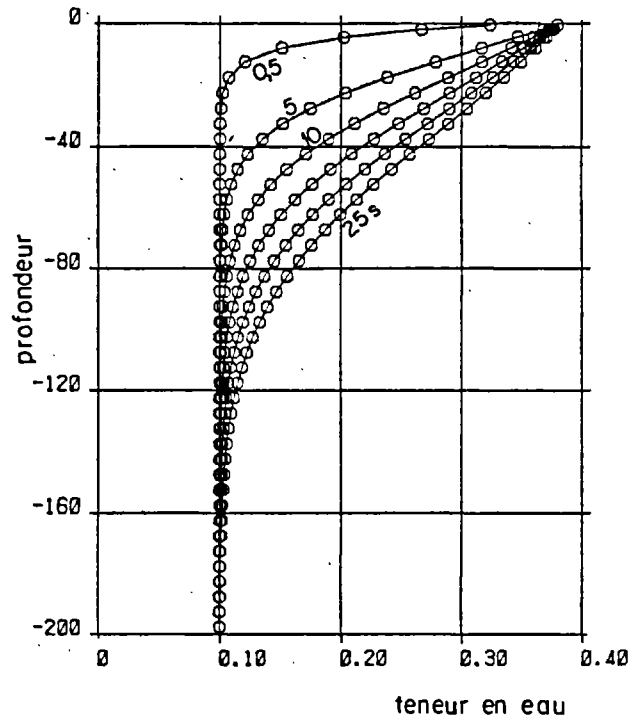


Figure 20 - Solution analytique de Ogata et Banks. Trait continu = solution analytique. Cercles = modèle MERINOS

ANNEXE

NOMBRE D'ITERATIONS ET CŒFFICIENT DE SOUS-RELAXATION

En cas de sous-relaxation la convergence est volontairement ralentie pour augmenter la régularité et éviter les oscillations. Il faut donc un nombre minimal d'itérations pour assurer la convergence. Supposons, pour simplifier, qu'à partir d'une charge initiale Hi (ou une autre variable), la solution finale soit Hf. La variation totale est DH = Hf - Hi. Supposons qu'à chaque itération la résolution des calculs (avant sous-relaxation) donne à chaque fois Hf ce qui est bien entendu optimiste puisque les cœfficients d'échanges varient.

Soit un cœfficient de relaxation r ($r < 1$).

Après sous relaxation on obtient pour la première itération :

$H_1 = H_i + r.DH$

L'écart à la solution finale est donc :

$e_1 = H_f - H_1 = (1 - r) . DH$

Par récurrence on obtient immédiatement l'écart après la nième itération :

$$e_n = (1 - r)^n . DH$$

soit pour une erreur relative cherchée $e = e_n / DH$:

$$n = \frac{Ln\, e}{Ln\,(1-r)} = \frac{\log e}{\log (1-r)}$$

Le tableau suivant donne le nombre n minimal d'itérations nécessaires pour atteindre la précision e = 1% ou 0.1 % en fonction du taux r de relaxation :

Nombre d'itérations

	e = 1%	e = 0.1 %
r = 0,9	2	3
0,8	3	5
0,5	7	10
0,3	13	20
0,2	21	31
0,1	44	66
0,05	90	135

Ce nombre d'itérations est un nombre minimal à ajouter bien entendu au nombre minimal d'itérations nécessaires à la résolution normale du système.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AUSSEUR J.Y., BONNET M., SAUTY J.P., VANDENBEUSCH M. (1979) - Recharge des nappes à travers la zone non saturée. Mesures et modélisation. Rapport BRGM 79 SGN 787 HYD.

BARRES M., SAUTER M. (1985) - Etude sur site expérimental de la migration en terrain semi-perméable d'effluents issus de boues industrielles. ANRED, Ministère de l'Environnement, contrats n° 83-145 et 83-284. Rapport BRGM n° 85 SGN 015 EAU.

BELL J.P., DEAN T.J. and HODNETT M.G. (1987) - Soil Moisture measurement by an improved capacitance Technique, Part II Field techniques, Evaluation and Calibration. Journal of Hydrology 93 (1987), pp. 79-90.

BENES V. (1986) - Movement of agrochemicals in the unsaturated ans saturated zones -in Impact of agricultural activities on groundwater J. VRBA, E. ROMIJN IAH - Vol. 5, Hannover, Heise.

BERNDTSSON R., LARSON M. (1987) - Spatial variability of infiltration in a semi arid environment. Journal of Hydrology 90 (1987), pp. 117-133.

BOULIER J.F. (1985) - Modélisation stockastique de l'infiltration en milieu poreux non uniforme. Application à une parcelle micro irriguée. Thèse Université Scientif. et Médicale de Grenoble Mai 1985.

BROOKS R.H. and COREY A.T. (1966) - Properties of porous media affecting fluid flow ASCE Irrig Drain Div. 92 (IRZ): 61-88.

DEAN T.J., BELL J.P., BATY A.I.B. (1987) - Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, Part I. Sensor design and performance Journal of Hydrology 93 (1987), pp. 67-78.

De SMEDT F., WAUTERS F., SEVILLA J. (1986) - Study of tracer movement through unsaturated sand. Journal of hydrology 85 (1986), pp. 169-181.

GREEN W.H. and AMPT G.A. (1911) - Studies on Soil physics (I). The flow of air and water through soils. J. of Agric. Sci., 4 : 1-24.

HAVERKAMP R., VAUCLIN M., TOUMA J., WIERENGA P.J., VACHAUD G. (1977) - Comparison of Numerical Simulation Models for One Dimensional Infiltration. Soil Science Society of American Journal. Vol. 41 (1977).

HILLEL D. (1974) - L'eau et le sol, principe et processus physiques. Vander Editeur, Louvin 288 pages.

JAYAWARDENA A.W. and KALUARACHCHI J.J. (1986) - Infiltration into decomposed granite soils: numerical modelling, application and some laboratory observations. Journal of Hydrology 84 (1986), pp. 231-260.

JOHANSSON P.O. (1987) - Estimation of groundwater recharge in sandy till with two different methods using groundwater level fluctuations. Journal of hydrology 90 (1987), pp. 183-198.

KAIHOTSU I., TANAKA T. (1982) - Mechanism of vertical water movement in Kanto Loam during and after rainfall. Improvement of methods of long term prediction of variations in groundwater Resources and Regimes due to human activities. Proceedings of the Exeter Symposium July 1982. IAHS Publ. 136, pp. 135-147.

KESSLER A., HILLEL R. (1987) - Relationship between water infiltration and oil spill migration in sandy soils. Journal of Hydrology 91 (1987), pp. 187-204.

LIBARDI P.L., REICHARDT K., NIELSEN D.R. and BIGGAR J.W. (1980) - Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. An. Proc. 38, pp. 568-572.

MERZOUGUI M., GIFFORD G.F. (1987) - Spatial variability of infiltration rates on a semi arid seeded rangeland Hydrological Sciences. journal des Sciences hydrologiques 32, 2, 6, (1987).

MUALEM Y. and DAGAN G. (1976) - Methods of predicting the Hydraulic conductivity of unsaturated soils. hydrodyn. hydraul. Lab. Technion. Israël Inst. Techn. Haïfa, Israël.

OGATA A. and BANKS R.B. (1961) - A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media. US Geol., Prof., Pap. n° 411-A. US Govt. printing office, Washington DC.

PARLANGE J.Y. (1971) - Theory of Water Movement in Soils: 2 One Dimensional Infiltration. Soil Sci. 111: 170-174.

PARLANGE J.Y. (1972) - Theory of water movement in soils : 8. One dimensional infiltration with constant flux at the surface. Soil Science 114, pp. 1-4.

PHILIP J.R. (1957) - The theory of infiltration: 1 - The infiltration equation and its solutions. Soil Sci. 83, pp. 345-357. 2 - The profile at infinity. Soil Sci. 83, pp. 435-448.

RAO N.H. (1987) - Field test of a simple soil-water balance model for irrigated areas. Journal of Hydrology 91 (1987), pp. 179-186.

REYNOLDS B., POMEROY A.B. (1958) - Hydrogeochemistry of chloride in an upland catchment in mid Wales. Journal of Hydrology 99 (1988), pp. 19-32.

RICHARDS L.A. (1931) - Capillary conduction of liquids through porous mediums-Physics, 1931,T.1, pp. 318 à 333.

RICHTER J. (1987) - The soil as a reactor-modelling Processes in the soil - Catena Verlag Cremlingen West Germany (ISBN 3-923381-09-3).

ROCHON J., THIERY D. (1981) - Physico-chemical exchanges and transfer of pollution in aquifers. Proceedings of Euromech 143 Delft Sept. 1981.

ROYER J.M. (1974) - Determination directe de l'évaporation et de l'infiltration sur bassins versants. Thèse Univ. Scient. et Médicale de Grenoble janvier 1974.

SAUTER M. (1980) - Etude sur site expérimental de la migration en terrain semi-perméable d'effluents issus de boues industrielles. Thèse de doctorat de 3ème cycle à l'Université d'Orléans UER de Sciences fondamentales et appliquées. Ressources et matériaux minéraux. Novembre 1980.

SHARMA M.L. (1986) - Measurement and prediction of natural groundwater recharge - an overwiew. Journal of Hydrology (N.Z.). Vol. 25, n° 1, 1986, pp. 49-56.

SUKHIJA B.S., REDDY D.V., NAGABHUSHANAM P., CHAND R. (1988) - Validity of the environmental chloride method for recharge evaluation of coastal aquifers, India. Journal of Hydrology 99 (1988), pp. 349-366.

THIERY D. (1988) - Calculation of natural aquifer recharge from rainfall with an unsaturated zone model solving Richards equation. Communication au Symposium International de l'AIRH sur "Interaction entre eaux souterraines et eaux de surfaces", 30 mai - 3 juin 1988, Vsad, Suède.

TURC L. (1961) - Evaluation des besoins en eau d'irrigation. Evapotranspiration potentielle. Ann. Agron., 12.

TOUMA J. (1984) - Etude critique de la caractérisation hydrodynamique des sols non saturés : rôle de l'air, influence de l'écoulement multi-dimensionnel de l'eau. Doct. es Sciences Physiques. Grenoble.

URBAN J.B., GBUREK W.J. (1988) - Determination of Aquifer parameters at a Groundwater Recharge site. Groundwater Vol. 26, n° 1 jan. Fev. 1988, pp. 39-53.

VACHAUD G., DANCETTE C., SONKO S., THONY J.L. (1978) - Méthodes de caractérisation *in situ* d'un sol non saturé. Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique. Ann. Agron. 1978, 29 (1), pp. 1-36.

VACHAUD G., VAUCLIN M., COLOMBANI J. (1981) - Bilan dans le Sud Tunisien. Caractérisation expérimentale des transferts dans la zone non saturée en sol stratifié. Journal of Hydrology, 49 (1981), pp. 31-52.

VACHAUD G., VAUCLIN M., ADDISCOTT T.M. (1988) - Solute transport in the Vadose zone: a review of models. International Symposium on water quality modelling of Agriculture Non-Point Sources. Logan (UTAH) juin 1988.

VALOCCHI, A.J. (1989) - Application of the random walk method to simulate the transport of kinetically adsorbing solutes. Groundwater contamination. Proceeding of the Symposium held during the third IAHS scientific Assembly Baltimore, May 1989 IAHS publ. n° 185, 1989, pp. 35-42.

VAN ROOY D., KEIDSER A., ROSBJERG D. (1989) - Inverse Modelling of flow and transport. Groundwater Contamination-Proceedings of the Symposium held during the third IAHS scientific Assembly Baltimore, May 1989 IAHS publ. n° 185, 1989, pp. 11-23.

VAUCLIN M., HAVERKAMP R., VACHAUD G. (1979) - Résolution numérique d'une équation de diffusion non linéaire. Presses universitaires de Grenoble, 1979, 183 pages.

VAUCLIN M., VAUCHAUD G. (1981) - Bilan hydrique dans le sud tunisien. II - Modélisation numérique et prévision de transferts hydriques en sol stratifié. Journal of Hydrology 49 1981, pp. 53-73.

VAUCLIN M. (1982) - Infiltration in unsaturated soils. Lecture at Nato Advanced study Institute on "Mechanics of fluids in porous media new approaches in research" Newark (Del.) July 1982.

VAUCLIN M., IMBERNON J., VACHAUD G. et DANCETTE C. (1983) - Description experimentale et modelisation stochastique des transferts par mise en facteur d'échelle des propriétés hydrodynamiques des sols. IAEA symposium aix-en-Provence 1983. SM 267/25, pp. 103-124.

VAUCLIN M., VACHAUD G. (1984) - Transferts hydriques dans les sols non saturés, non homogènes. Annales des Mines Mai-Juin 1984.

WARRICK A.W., AMOOZEGAR-FARD (1979) - Infiltration and drainage calculations using spatially scaled hydraulic properties. Water Resources Res. 1979-13, pp. 348-354.

WHEATER H.S., SHERRAT D.J., NWABUZOR S.S. (1982) - Assessment of the effects of land use on groundwater recharge. Improvement of methods of long term prediction of variations in groundwater Resources and Regimes due to human activities. Proceedings of the Exeter Symposium July 1982. IAHS Publ. 136, pp. 135-147.

LEXIQUE

Calage	C'est le réglage d'un modèle, c'est-à-dire l'ajustement des paramètres pour que le moèdle représente le sol étudié.
Capacité capillaire	"Coefficient d'emmagasinement" équivalent par unité d'épaisseur. La capacité capillaire dépend de l'état de saturation.
Charge	Etat d'énergie au-dessus d'un niveau de référence. La charge est égale à la somme de l'altitude et de la pression.
Coefficient d'emmagasinement	Coefficient qui exprime la quantité d'eau que peut emmagasiner un mètre carré de sol, si on augmente sa charge de 1 mètre.
Ecoulement en charge	C'est un écoulement qui se produit dans une zone de sol saturé avec une charge supérieure à l'altitude.
Equipotentielle	C'est une ligne qui joint des points d'égale charge.
Flux	Débit par unité de surface.
Gradient unitaire	Sol dont la pression ne varie pas avec l'altitude. La variation de charge est alors égale à la variation d'altitude.
Humidité	(Voir teneur en eau).
Loi de rétention	Relation entre pression et teneur en eau.
Maille	Petit élément considéré comme homogène (charge uniforme, teneur en eau uniforme...).
Paramètre	Les caractéristiques d'un sol ou d'un modèle sont appelées paramètres (exemple : teneur en eau à saturation, perméabilité à saturation).
Pas de temps	Petit intervalle de temps utilisé pour les calculs en régime transitoire.
Perméabilité	Capacité du sol à laisser passer de forts débits pour une différence de charge donnée. La perméabilité décroit avec la diminution de teneur en eau.
Plan de flux nul	Altitude à laquelle aucun flux n'est observé : le flux de la zone située au-dessus de cette altitude s'écoule vers le haut, celui de la zone située en dessous s'écoule vers le bas. Quand il y a plusieurs plans de flux nul, on se réfère généralement au plus proche de la surface.
Potentiel	Le potentiel hydraulique est la charge.
Pression	Force par unité de surface exercée par le sol sur l'eau. (quand le sol n'est pas saturé la pression est négative).

Régime permanent	Etat d'un sol en équilibre ; en un point donné la charge, la teneur en eau et le débit sont constants ; ceci est valable en tout point du sol.
Régime transitoire	Etat d'un sol qui n'est pas en équilibre. Par exemple, après une sollicitation, on observe un régime transitoire avant l'établissement éventuel d'un régime permanent.
Réglage	Voir "Calage".
Saturation	Etat d'un sol dont la teneur en eau est maximale.
Sollicitation	C'est une variation des conditions aux limites (charge teneur en eau ou flux imposé).
Stock	Hauteur d'eau équivalente dans une tranche de sol (c'est un volume d'eau par unité de surface).
Succion	Etat de dépression du sol non saturé (la succion est comptée positivement ; c'est l'opposé de la pression).
Teneur en eau	Volume d'eau par unité de volume de sol (synonyme humidité volumique).

INDEX

	Pages
Agencement des couches	2, 3, 14, 15
Ajustement des lois caractéristiques	73 à 75
Analyse dimensionnelle	57 à 64
Altitude	8, 17, 20, 27
Bilan des débits	24 à 27
Capacité capillaire	51
Coefficient d'emmagasinement	48, 51
Convergence	13, 14, 34
Débit résiduel	13, 24, 25, 32, 34
Domaine d'application	2, 3
Etat initial	3, 19, 20, 23, 28, 31
Evapotranspiration	13, 22, 27, 54
Exemples de maillage	28, 95 à 97
Exemples d'application	28 à 43
Fichiers de données en entrée	7, 9, 23
Fichier paramètres	8 à 21, 30, 38 à 41
Fichiers de résultats	7, 9, 10, 23 à 28
Hauteur résiduelle	35
Humidité	8, 15, 27
Historiques	10, 21, 25, 32
Initialisation	22, 23
Itérations	13, 102
Loi de rétention	14, 15, 67 à 70
Loi de perméabilité	14, 15, 70 à 72
Nombre de mailles	14
Ordinateurs	Introduction, 3
Pas de temps	12, 23

	Pages
Pluie efficace	22
Perméabilité	13, 53, 70 à 72
Plan de flux nul	26, 36
Pré et Post processeurs	3, 8, 22, 23, 29
Pression	8
Profil	21, 25, 26
Recharge	21, 25, 2624, 26
Référence des altitudes et des charges	17
Régime transitoire	12
Ruissellement	24, 26, 27, 54
Schéma de résolution	3, 14, 48 à 54
Sous relaxation	14
Stock	8, 20, 24, 26, 27, 42
Succion	13, 47
Teneur en eau	8, 15, 27
Unités	11
Validation du modèle	93 à 97
Visulation des résultats	3